

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

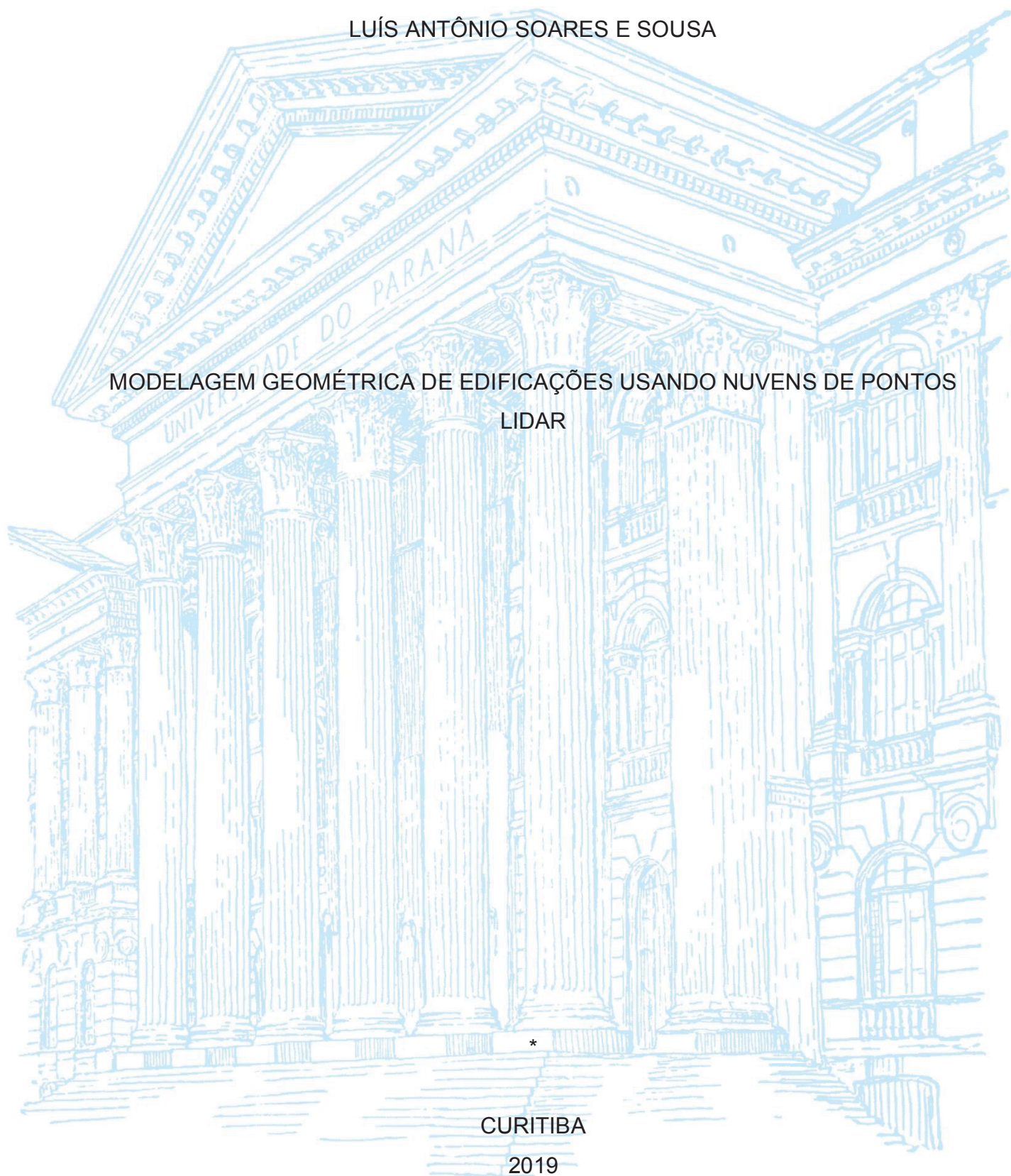
LUÍS ANTÔNIO SOARES E SOUSA

MODELAGEM GEOMÉTRICA DE EDIFICAÇÕES USANDO NUVENS DE PONTOS
LIDAR

*

CURITIBA

2019



LUÍS ANTÔNIO SOARES E SOUSA

MODELAGEM GEOMÉTRICA DE EDIFICAÇÕES USANDO NUVENS DE PONTOS

LIDAR

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra – CT, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Jorge A. Silva Centeno.

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S725m Sousa, Luís Antônio Soares e
Modelagem geométrica de edificações usando nuvens de pontos
LIDAR. [recurso eletrônico] / Luís Antônio Soares e Sousa – Curitiba,
2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da
Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Antônio Silva Centeno

1. Sensoriamento remoto. 2. Modelagem Geométrica. 3. Edificações
(Telhados e fachadas). I. Universidade Federal do Paraná. II. Centeno,
Jorge Antônio Silva. III. Título.

CDD: 526.640285

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUIS ANTÔNIO SOARES E SOUSA** intitulada: **Modelagem geométrica de edificações usando nuvens de pontos LiDAR**, sob orientação do Prof. Dr. JORGE ANTONIO SILVA CENTENO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

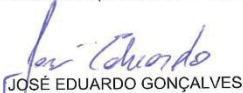
A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 30 de Janeiro de 2020.



JORGE ANTONIO SILVA CENTENO

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



JOSÉ EDUARDO GONÇALVES

Avaliador Externo (INSTITUTO TECNOLÓGICO SIMEPAR)



EDSON APARECIDO MITISHITA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Quand je serai un grand moi je mettrai les voiles pour parcourir les ciels de mes rêves d'enfants.

Quand je serai un grand moi je mettrai les voiles. Je sais qu'autour de moi le monde y est plus grand.

AGRADECIMENTOS

Talvez esta parte tenha sido a mais difícil de escrever! Sempre tive a sorte de ter ao meu lado muitas pessoas especiais e me sinto grato por tê-los em minha vida. Cada um com sua singularidade, deixou uma marca em mim, me fazendo crescer e me tornar um ser humano melhor.

Aos meus pais, por terem me dado educação, valores e por terem me ensinado a trilhar o caminho do bem, priorizando e dando condições para que eu continuasse estudando. Às minhas irmãs por me motivarem e serem um exemplo de força. A vocês que, muitas vezes, renunciaram aos seus sonhos para que eu pudesse realizar o meu, a vocês que conseguiram lidar com a saudade e a distância, partilho a alegria deste momento e me desculpo pela ausência neste tempo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge A. Silva Centeno pela paciência, conhecimento compartilhado, confiança e por todo o tempo dedicado. Nos momentos difíceis soube me conduzir e me acalmar, sendo sempre positivo e tolerante. Obrigado pela paciência e apoio.

Especialmente, sou grato às pessoas que tornaram meus dias mais leves, estando ao meu lado em todos os momentos, sempre com as palavras certas para me acalantar, me fazer acreditar que eu seria capaz e me abraçarem quando as coisas não faziam mais sentido. Graças a vocês, hoje minha segunda família, que suportei períodos difíceis e me fizeram permanecer aqui.

Aos antigos amigos, Fran, Mari, Ruiva, Tefa, agradeço por se manterem presentes a minha vida mesmo com rotinas e cidades distintas.

Aos amigos frutos de uma época tão especial, Carol, Thais, Renata, Paula, Regina, Lo e Rafa, Cauê e Laura, Matheus, Allanzinho, Onozato, agradeço por me permitirem descobrir a França e o mundo com vocês.

Aos amigos que o mestrado me trouxe, Carla, Su, Flavia, Lucas, Daniel, Eduardo, Welliton, Kelvin, Jaque, Iris, pelas conversas, discussões, apoio e cafés.

Às pessoas especiais que surgiram na minha vida de maneiras diversas, inesperadas, mas igualmente intensas: Renan, Gabi, Olivia, Janiny, Andressa, Thairine, Matheus, Mari e Stephanie.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) e à Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela oportunidade dada e por insistirem na educação pública e de qualidade para todos.

Por fim, agradeço ao LACTEC que subsidiou este trabalho, dando condições para que mesmo fosse realizado com êxito, financiando e dando uma infraestrutura adequada para o desenvolvimento da pesquisa. Em especial, minha gratidão ao Fabiano Scheer pelo suporte e atenção neste período, bem como aos colegas de trabalho da Geossoluções.

Agradeço à vida e aos dias vividos por me mostrarem que viver não cabe no Lattes. Hoje, com novas perspectivas, finalizo uma etapa e dou início a outra, cheio de energia para realizar antigos e novos sonhos. Afinal, “cada sonho que você deixa pra trás, é um pedaço do seu futuro que deixa de existir” (*Steve Jobs*).

RESUMO

O LiDAR se consolidou como uma tecnologia capaz de auxiliar em análises no meio urbano. Dentre elas, cita-se o uso das informações tridimensionais para detectar e modelar edificações. Esta dissertação trata de desenvolver uma metodologia semiautomática objetivando produzir modelos tridimensionais de edificações, envolvendo fachadas e telhados. O estudo proposto se baseia na extração de informações sobre uma nuvem de pontos coletadas a partir de um aerolevanteamento LiDAR Pegasus HD500 e outro levantamento terrestre móvel por um Pegasus One. Como resultado, conseguiu-se segmentar a nuvem de pontos e gerar um modelo 3D das áreas de estudo.

Palavras-chave: Modelagem de Edificações, Modelagem Geométrica, Modelagem de fachadas, Modelagem de Telhados, LiDAR, Segmentação de nuvem de pontos.

ABSTRACT

LiDAR is an established technology capable of assisting in urban analysis. These include the use of three-dimensional information to detect and model buildings. This dissertation aims to develop a semi - automatic methodology to produce three - dimensional models of buildings, involving the facades and roofs. The proposed study is based on the extraction of information about a point cloud collected from a LiDAR Pegasus HD500 aerial survey and another mobile land survey by a Pegasus One. As a result, it was possible to segment the point cloud and generate a 3D model of the study areas.

Keywords: Building Modeling, Geometric Modeling, Facade Modeling, Roof Modeling, LiDAR, Cloud Points Segmentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do projeto em diferentes níveis de lod.....	24
Figura 2 - Localização das áreas de estudo.....	34
Figura 3 - Recorte inicial da Nuvem de pontos do Sistema <i>Pegasus</i> HD500.....	33
Figura 4 - Percurso e área levantada pelo MTLs.	35
Figura 5 - Componentes do sistema <i>Pegasus One</i>	36
Figura 6 - Sistema ALTM <i>Pegasus</i> HD500.	37
Figura 7 - Organograma da metodologia.....	40
Figura 8 - Rotação da edificação para que o eixo X seja paralelo à fachada, o eixo Y seja a profundidade e o Z seja a altura.	41
Figura 9 - Geração de um histograma de frequência em uma nuvem de pontos TLS com picos diferentes para edificação e vegetação.	43
Figura 10 - Remoção da vegetação baseada no histograma de frequência ao longo do eixo X usando o limiar de densidade L.	44
Figura 11 - Divisão de uma fachada em blocos a partir da diferença expressiva de altura.	44
Figura 12 - Exemplo de definição errônea dos blocos em casas geminadas.	45
Figura 13 - Utilização de Morfologia Matemática (erosão/dilatação) para remover pontos espúrios.	46
Figura 14 - Geração de um perfil longitudinal de uma cena com duas edificações para detecção de pontos de borda e, a partir disso, definição dos blocos de fachada.	46
Figura 15 - Conceito de planos de fachada em uma edificação com três níveis de profundidade.	47
Figura 16 - Geração do Histograma de Profundidade.	48
Figura 17 - Identificação de pontos de borda utilizando uma grade regular e, em sequência, aplicação da Triangulação de Delaunay.	49
Figura 18 - Representação da geometria nos eixos X e Z de uma fachada com porta e janelas.....	50
Figura 19 - Geração de histogramas de frequência no eixo X e no eixo Z para detecção dos contornos baseada nos maiores picos.	50
Figura 20 - Aplicação de uma grade irregular sobre a nuvem de pontos e definição dos blocos de parede a partir da análise de densidade mínima esperada para esta superfície.....	51
Figura 21 - Numeracao dos blocos existentes em ordem crescente da esquerda para direita.....	52
Figura 22 - Uniao de blocos a partir da toria dos Compentes Conexos.....	52
Figura 23- Modelo tridimensional de uma fachada gerado pelo agrupamento de blocos.	53
Figura 24 - Finalização do modelo no Sketchup, inserindo cor, textura e objetos.	54
Figura 25 - Organograma da metologia aplicada para a modelagem de telhado.....	55
Figura 26 - Aproximação de um modelo a partir da aplicação do algoritmo de adensamento progressivo em uma triangulação de Delaunay inicial.	58
Figura 27 - Resultado da aproximação inicial do modelo.	58
Figura 28 - Extração dos contornos dos telhados pela análise dos histogramas em X e Y.	59

Figura 29 - Identificação dos vértices dos planos que compõem os telhados.....	60
Figura 30 - DTM, pontos com valor 0, 1 e 2; e solução final.	60
Figura 31 - Edificações que compõem o experimento 1. Destacados em amarelo, tem-se a vista área das mesmas e em vermelho, a nuvem de pontos TLS.....	61
Figura 32 - Nuvem de pontos TLS orientada aos eixos com o plano de fachada principal paralelo o eixo X.	62
Figura 33 - Remoção da edificação utilizando histograma de frequência.	63
Figura 34 - Exemplo de suavização do perfil de uma nuvem de pontos contendo dois prédios: (a) Perfil da nuvem de pontos, (b) perfil após a suavização.	63
Figura 35 – Identificação dos pontos em que há variação angular de aproximadamente 90 graus entre o ponto anterior e posterior.	64
Figura 36 – Blocos de fachada identificados por cores obtidos pela análise do perfil suavizado da nuvem de pontos.	64
Figura 37 – Segmentação da nuvem de pontos em diferentes profundidades para o Bloco 1.	65
Figura 38 – Comparação da segmentação da nuvem de pontos com a imagem real da edificação.	66
Figura 39 - Segmentação da nuvem de pontos em diferentes profundidades para o Bloco 2.	66
Figura 40 – Comparação da segmentação do Bloco 2 com a fachada real. Em destaque, parte da nuvem de pontos removida pelo algoritmo.	67
Figura 41 - Segmentação da nuvem de pontos em diferentes profundidades para o Bloco 3.	67
Figura 42 - Comparação da segmentação do Bloco 3 com a fachada real. Em destaque, objetos presentes na fachada que não apareceram na segmentação.	68
Figura 43 - Segmentação da nuvem de pontos em diferentes profundidades para o Bloco 4.	68
Figura 44 - Comparação da segmentação do Bloco 4 com a fachada real.	69
Figura 45 - Os pontos identificados com uma seta representam picos do histograma e foram considerados pontos de borda.	70
Figura 46 – Identificação das linhas de contorno para uma edificação baseado na análise dos picos do histograma em Z e X.....	70
Figura 47 - Resultado do Experimento 1: (a) Bloco 4 gerado inicialmente e (b) bloco 4 finalizado.	72
Figura 48 – Demais resultados do Experimento 1: (a) Blocos gerados inicialmente e (b) blocos finalizados.	73
Figura 49 – Comparação dos modelos finais já com os blocos agrupados com as fachadas reais.....	74
Figura 50 – Níveis de detalhamento previsto pelo LoD.	76
Figura 51 – Modelos finais renderizados utilizando software Lumion.	77
Figura 52 – Edificação do Experimento 2. Destacados em amarelo, tem-se a vista área da mesma e em vermelho, a nuvem de pontos TLS.	78
Figura 53 – Resultado obtido ao aplicar o filtro de remoção da vegetação.	79
Figura 54 – Blocos divididos pela diferença de altura e identificados por cores.	79
Figura 55 – Resultado da segmentação da nuvem dos pontos por níveis de profundidade.	80
Figura 56 - (a) situação ideal (b) situação não ideal.	80

Figura 57 – Tentativa de geração dos blocos 3D a partir da segmentação por níveis de profundidade.	81
Figura 58 - Edificação do Experimento 3.....	81
Figura 59 - Blocos divididos pela diferença de altura e identificados por cores.	82
Figura 60 - Segmentação da nuvem de pontos em diferentes profundidades para o Experimento 3.....	82
Figura 61 – Comparação da segmentação da nuvem de pontos com a imagem real da fachada. Pontos em vermelho pilares e em verde, o plano principal da fachada.....	83
Figura 62 - Resultado do Experimento 3: (a) Bloco gerado inicialmente e (b) bloco finalizado.	83
Figura 63 – Análise do telhado da Edificação 3: (a) Imagem de satélite do prédio (Google Earth), (b) Nuvem de pontos da edificação e (c) resultado genérico obtido com o processamento.	84
Figura 64 – Edificação do Experimento 4.	84
Figura 65 - Indicação dos pilares internos do bloco.....	85
Figura 66 - Resultado do Experimento 4: (a) Bloco gerado inicialmente e (b) bloco finalizado.	85
Figura 67 – Edificação do Experimento 5.	86
Figura 68 – Resultado do Experimento 5: (a) Bloco gerado inicialmente e (b) bloco finalizado.	87

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Níveis de detalhamento do BIM.....	24
QUADRO 2 - Características de desempenho do Pegasus HD500.....	37
QUADRO 3 - Blocos para cada faixa obtidos a partir de limiares diversos.	71
QUADRO 4 - Resultados dos modelos sem suavização.	74
QUADRO 5 - Resultados dos modelos após suavização.	76
QUADRO 6 – Principais softwares BIM.....	88
QUADRO 7- Soluções para converter arquivos para o .ifc	89

LISTA DE ABREVIATURAS

AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
AIA	American Institute of Architects
ALS	Airbone Laser Scanning
BIM	Building Information Model
CAD	Computer Aided Design
DMI	Distance-Measuring Instruments
GHT	Transformação de Hough Generalizada
GNSS	Global Navigation Satellite System
IFC	Industry Class Foundation
IMU	Inertial measurement unit
ISM	Improved Slicing Method
LiDAR	Light Detection And Ranging
LMS	LiDAR Mapping Suite
LoD	Level of Detail
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MPiA	Múltiplos Pulsos no Ar
MTLS	Sistema Laser Terrestre Móvel
PCA	Análise de Componentes Principais
PRF	Pulse Repetition Frequency
RANSAC	Random Sample Consensus
SM	Slicing Method
TLS	Terrestrial Laser Scanning
TI	Tecnologia da Informação
TIN	Triangulated irregular network
UFPR	Universidade Federal do Paraná

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO	15
1.2. OBJETIVOS.....	18
1.2.1. Objetivo geral	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. JUSTIFICATIVA	18
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2. REVISÃO DE LITERATURA E CONCEITOS FUNDAMENTAIS	21
2.1. MODELAGEM 3D	21
2.1.3. LoD (level of Detail).....	23
2.1.4. Modelagem de edificações via BIM	25
2.2. RECONSTRUÇÃO DE TELHADOS.....	26
2.3. RECONSTRUÇÃO DE FACHADAS USANDO LIDAR.....	27
2.4. SEGMENTAÇÃO DE FACHADAS	29
3. MATERIAIS E MÉTODO.....	34
3.1. MATERIAIS	34
3.1.1. Área de estudo	34
3.1.2. Sistema Laser Terrestre móvel <i>Pegasus One</i>	36
3.1.3. Sistema LiDAR aéreo ATML <i>Pegasus HD500</i>	37
3.1.4. Bibliotecas e softwares utilizados	38
3.2. MÉTODO	39
3.2.1. Pré-processamento do levantamento terrestre	39
3.2.2. Modelagem de fachadas	40
3.2.3. Modelagem do telhado.....	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5. CONCLUSÃO	90
REFERENCIAS	92

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO

O meio urbano sofre regularmente alterações seja pela ação antrópica, efeito do tempo ou meio ambiente. Pesquisas mostram que, principalmente em grandes cidades, o índice de novas construções está entrando em declínio enquanto o número de processos de reforma e manutenção edifícios existentes cresce consideravelmente, muitas das vezes visando adaptá-los às modernas condições de habitabilidade e sustentabilidade (BROWN et al., 2005). Nos Estados Unidos, o número de novas construções se encontra entre 2 a 3% do estoque de edificações existentes por ano, o que abre margem para o desenvolvimento de metodologias visando melhorias nos processos de reforma ou restauração de edificações já construídas (BROWN et al., 2005). Este processo demanda informação atualizada do objeto a ser trabalhado.

Sabendo que para a análise e compreensão da história das cidades e da sociedade, a arquitetura tem papel relevante por servir como referência e por materializar os modos de vida e de construção de uma época nas edificações, se faz importante a existência de metodologias que tornem o processo de gerenciamento de uma construção o mais otimizado possível. Com isso, o levantamento de edifícios existentes, considerado um processo de engenharia reversa onde a partir das informações obtidas do objeto real, se reconstrói e interpreta a ideia anterior a sua realização, se torna um desafio para o meio científico.

Akcamete et al. (2010) descrevem formas de como a modelagem tridimensional de edificações pode contribuir para analisar o comportamento e deterioração do edifício ao longo do tempo, dando subsídios para coletar informações acerca do estado atual da edificação, bem como de seu histórico de manutenção e anteriores modificações na estrutura. Logo, segundo Leão (2013) pode-se representar, de maneira consistente e coordenada, todas as informações e etapas de um edifício, desde o estudo preliminar até a demolição, sendo uma ferramenta com o potencial de revolucionar as perspectivas atuais do produto da indústria da construção civil, tanto em relação ao projeto em si, quanto em termos de execução e operação da edificação.

As comunidades europeias e norte-americanas já perceberam a importância desta ferramenta na arquitetura e engenharia, tratando de forma integrada os

elementos de projeto, da obra e processos gerenciais através do uso de modelos virtuais (FIESP, 2008a). Apesar das experiências internacionais confirmarem a forte tendência e potencial de adoção da tecnologia, alguns fatores dificultam a implantação efetiva da tecnologia no Brasil, como a escassez de mão-de-obra especializada, a resistência à mudança, o alto investimento com máquinas e treinamento (NASCIMENTO; SANTOS, 2003). Isso se reflete também no meio acadêmico, onde por ser um conceito relativamente novo, há uma carência de estudos que se visam a modelagem tridimensional de edificações.

O levantamento de edifícios existentes é considerado um processo no qual, a partir das informações obtidas do objeto real, se reconstrói, interpreta e materializa a ideia anterior a sua realização. Devido ao alto índice de riqueza de detalhes, bem como as diferentes feições existentes em uma cena urbana ou em uma única edificação, torna-se um desafio desenvolver metodologias simples que possam ser utilizadas no processo de análise, identificação e extração das características de um patrimônio e que possam ser generalizadas às distintas edificações.

A modelagem de edificações baseado em elementos sólidos 3D começou a se desenvolver no final das décadas de 70 e início de 80, dando pontapé inicial para pesquisas sobre a modelagem de produto na indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC). Nos Estados Unidos tinha-se o conceito inicial denominado *Building Product Models* e na Europa e Finlândia era apresentado como *Product Information Model* (EASTMAN et al., 2008). Outros trabalhos a respeito desta modelagem podem ser encontrados em Eastman (1975).

Historicamente, os primeiros códigos de programação de um sistema para elaboração de um projeto em 3D foram inseridos numa calculadora, em 1982, em uma usina nuclear na Hungria. A partir de então, o ingresso da computação na arquitetura revolucionou o processo de criação, de projeto e até mesmo a percepção do espaço, dando início à era do CAD (*Computer Aided Design*) (FRANK, 2008). Segundo Kale & Arditi (2005) a tecnologia CAD é a inovação mais importante dos últimos 40 anos, onde houve três gerações distintas na evolução do uso do computador na construção: o desenho assistido por computador, a modelagem geométrica e, por fim, a modelagem do produto.

Esta modelagem evolui para o conceito BIM (*Building information modeling*), ou a modelagem de espaços apoiada por várias tecnologias envolvendo a geração e gestão de representações digitais de características físicas e funcionais. Eastman et

al. (2013) definem o BIM como *"uma tecnologia de modelagem e um conjunto associado de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de construção"*. Campbell (2006) complementa que a existência do BIM é pautada em seis pilares principais: digital, espacial, mensurável, abrangente, acessível e durável. Todas essas informações unidas trazem um projeto digital composto por feições tridimensionais, passível de mensuração (quantificável, dimensionável e consultável); incorporando e comunicando a intenção de projeto, o desempenho da construção, a construtibilidade e aspectos sequenciais e financeiros de meios e métodos entre os diversos atores da obra e, por fim, pode-se ser usado em todas as fases de vida de uma edificação.

Um dos aspectos do BIM se baseia no estabelecimento de um protótipo virtual com parâmetros exatos de uma edificação, como a geometria precisa e informações detalhadas, necessárias para uma execução de um projeto com qualidade (Eastman et al., 2014). Segundo Baltsavias (1999), a tendência é o desenvolvimento de algoritmos para a modelagem das formas dos objetos, o que é proposto neste estudo. Sendo assim, este trabalho investiga o problema de gerar a representação de edificações de forma semiautomática com a finalidade de compor modelos tridimensionais detalhados, incluindo fachadas e telhados, que possam ser utilizados como subsídios para documentação do patrimônio e definição de planos de gestão, bem como suporte para planejamento de obras e melhorias. Outro desafio ainda maior, é conseguir unir informações de dados laser terrestres e aéreos para construção de um modelo único, tornando-o compatível com as ferramentas BIM, otimizando os processos de modelagem e aumentando o nível de detalhamento dos modelos que, na grande maioria, ainda são gerados por levantamentos manuais in loco.

Considerando os recentes avanços em termos de métodos de medição de coordenadas tridimensionais usando LiDAR, neste trabalho de mestrado pretende-se comprovar que é possível obter modelos tridimensionais de prédios usando métodos automáticos ou semiautomáticos de análise de nuvens de pontos LiDAR para a modelagem tridimensional de prédios.

Este estudo segue a premissa estabelecida por Campiotto (2016) de que é necessário desenvolver metodologias que se utilizem de novas tecnologias e que tragam agilidade, confiabilidade e maiores informações do produto dentro do contexto da obtenção da modelagem BIM.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho consiste em desenvolver uma metodologia semiautomática capaz de produzir modelos tridimensionais de edificações, tanto de fachadas quanto de telhados, utilizando dados coletados por levantamentos LiDAR (terrestre e aéreo), com vistas à modelagem 3D de edificações. Estes modelos devem incluir as principais feições arquitetônicas das edificações.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a. Desenvolver métodos para identificar os planos que compõem uma dada fachada a partir de nuvens de pontos de LiDAR terrestre;
- b. Desenvolver métodos para extrair os contornos das formas arquitetônicas das fachadas e produzir um modelo vetorial detalhado da fachada a partir de sua nuvem de pontos;
- c. Desenvolver métodos para modelar os telhados das edificações a partir de dados de LiDAR aerotransportado;
- d. Desenvolver métodos para unificar os modelos de fachadas e telhados;
- e. Tornar os resultados compatíveis e aplicáveis à tecnologia BIM.

1.3. JUSTIFICATIVA

Os primeiros esforços acerca do levantamento de edificações se deram utilizando levantamentos baseados na medição direta, com trena ou um teodolito, tendo como vantagem a simplicidade do processo e desvantagens a morosidade e alto custo, principalmente quando realizadas em monumentos ou sítios históricos ou edificações que possuam muitos detalhes.

Em uma segunda fase, novas tecnologias foram introduzidas e adaptadas para suprir as carências e agilizar os levantamentos. Como exemplo, a aplicação da Fotogrametria Digital se tornou o início de uma mudança significativa relacionada com

a agilidade e simplicidade dos processos, além de representar um aumento na precisão e diminuição de custos (GROETELAARS, 2004).

Com o surgimento de novas tecnologias na engenharia, como o levantamento de densas nuvens de pontos com LiDAR (*Ligth Detection and Ranging*), a maneira de medir e documentar a forma de um objeto passou por grandes modificações. A disponibilidade de uma grande quantidade de pontos em lugar de alguns pontos selecionados criteriosamente transformou o processo de medição.

O LiDAR se trata de uma tecnologia de detecção remota que permite a determinação de informações georreferenciadas ou outras propriedades de um objeto pela sua iluminação com radiação laser, obtendo como resultado uma nuvem de pontos densas (PEREIRA, 2011). Para estudos com fins de planejamento urbano e projetos de mapeamento planialtimétricos, utiliza-se este sistema de forma embarcada, sendo denominado de ALS – Airbone Laser Scanning fornecendo dados utilizados na geração de modelos digitais de terreno (MDT) e na modelagem de coberturas arquitetônicas.

Porém, utilizar apenas dados de varredura LiDAR aerotransportado, resulta em modelos simplificados de edifícios, especialmente na à definição de suas fachadas. Para isto, uma solução se trata da combinação do aerolevantamento LiDAR com o levantamento LiDAR terrestre, para que se obtenha um maior índice de detalhamento das fachadas. Assim, as informações podem ser complementadas e, conseqüentemente, os modelos obtidos anteriormente podem ser refinados (BOULAASSAL *et al.*, 2007). Logo, estas informações fornecem subsídios para a modelagem tridimensional detalhada de uma edificação sem a necessidade de coletas manuais diretas sobre a construção, podendo ser utilizado como fonte para análises BIM, tornando as etapas de uma obra, seja de planejamento, execução ou pós-obra, mais realistas e com maior confiabilidade.

Espera-se que com o uso integrado do sensor LiDAR *Pegasus* HD500 dotado de um sistema de múltiplos retornos, e o levantamento terrestre pelo modelo Laser Terrestre móvel *Pegasus One* aumente a densidade de pontos e, conseqüentemente, a qualidade na identificação e modelagem das edificações, o que contribuiria para reunir informações para extração de formas arquitetônicas nas fachadas e, conseqüentemente, gerar um modelo completo e detalhado da edificação.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. O primeiro capítulo refere-se à apresentação do tema a ser discutido e sua justificativa. No segundo são apresentados alguns conceitos fundamentais pertinentes ao tema, bem como a revisão de literatura com o estado da arte no tema. No terceiro capítulo são descritos os materiais e métodos que serão utilizados nessa pesquisa, bem como definição da área de estudo, os equipamentos e softwares. No quarto capítulo são apresentados os resultados e discussão dos mesmos. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa. Por fim, lista-se as referências bibliográficas utilizadas neste estudo.

2. REVISÃO DE LITERATURA E CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A extração de modelos 3D de uma edificação a partir de nuvens de pontos passou por diferentes etapas, na medida em que os sistemas LiDAR evoluíram. Sendo que o uso de LiDAR aerotransportado foi o que primeiro se popularizou e gerou dados para a modelagem 3D, as primeiras técnicas se baseiam principalmente na modelagem dos telhados e pouco se preocupam com os detalhes das paredes. Em uma segunda fase, com a maior aplicação de sistemas terrestres e móveis, a modelagem de fachadas ganhou atenção. Neste sentido, a seguir são apresentados brevemente conceitos de modelagem 3D e o nível de detalhamento para depois se concentrar na obtenção de modelos usando LiDAR. Nesse particular, são primeiramente apresentadas as principais técnicas de modelagem de telhados, por serem as primeiras formas de se obter modelos de construções para depois se concentrar na modelagem de fachadas e seus detalhes, principal objetivo deste trabalho.

2.1. MODELAGEM 3D

Basicamente pode se entender a modelagem 3D como o processo de criar (ou recriar) a representação digital de um objeto tridimensional, por meio de programas específicos de CAD que utiliza modelos matemáticos para a representação. Com essa técnica, é possível simular objetos e cenários. Embora esta técnica encontre aplicação em diversas áreas, como cinema e jogos, no contexto deste trabalho o termo será restrito à arquitetura e modelagem de edificações.

2.1.1. Modelagem Direta

O processo de modelagem direta está relacionado à utilização de softwares para vetorização de perfis necessários para o modelo 3D diretamente na nuvem de pontos. Porém, a desvantagem deste processo é que, por ser manual, o tempo de modelagem depende, principalmente, do número de seções a serem vetorizadas e da complexidade do objeto. Ou seja, quando se modela um objeto complexo com este método, é necessário muito tempo para realizar um modelo preciso, pois há a necessidade de um maior número de seções horizontais e verticais (Tommasi, 2016).

Ao final do processo cria-se um elemento único, que não pode ser facilmente adaptado a outras partes do edifício, necessitando de outra modelagem mesmo que sejam objetos semelhantes. Devido às várias etapas e comandos do usuário para se criar superfícies 3D, este processo pode se tornar muito moroso. Por estas razões, a modelagem direta acaba se tornando um obstáculo quando se deseja rapidez e facilidade para modelar objetos.

2.1.2. Modelagem Paramétrica

Eastman (2014) define a modelagem paramétrica como a representação de objetos, por meio de parâmetros e regras que define sua geometria, podendo possuir algumas propriedades e características não geométricas. Dentre estas pode-se inserir características que vão desde o tipo de materiais até ao tempo de construção da obra. De forma simples, a modelagem paramétrica é basicamente a construção do projeto utilizando objetos que possuem atributos e se relacionam entre si.

Isto permite que os profissionais possam ser capazes de criar sua própria biblioteca de objetos de forma personalizada, com propriedades e atributos compatíveis com suas necessidades, ou seja, desenvolver as próprias regras e padrões (Eastman et al., 2008). Ressalta-se ainda que os atributos de um objeto são essenciais para que se possa realizar a integração com as ferramentas de análise, como a estimativa de custos. Os parâmetros técnicos definidos servem de subsídio para filtrar o conjunto de soluções disponibilizadas pelos fabricantes, sendo separadas por: funcionalidade, desempenho construtivo, compatibilidade com outros materiais, resíduos produzidos, resultados de ensaios normalizados, reação a agentes de degradação, durabilidade entre outros (PISSARRA, 2010).

Estes objetos paramétricos personalizados são utilizados para modelar geometrias complexas, por exemplo, na indústria da AEC, tem-se um conjunto base, composto de classes de objetos para os usuários como portas, janelas, lajes, paredes, pilares, vigas, coberturas metálicas, etc (SALES; RUSCHEL, 2014).

A estrutura de um modelo paramétrico é composta por “famílias” de objetos contendo atributos de forma, atributos que não são de forma e relações. Devido à esta vasta gama de possibilidades de configuração de uma família de objetos, vê-se a complexidade e o cuidado necessários ao se definir um objeto genérico (ANDRADE e RUSCHEL, 2009).

O nível de precisão de um sistema é dado de acordo com a variedade de regras que podem estar contidas em certos gráficos paramétricos. Esses objetos são definidos utilizando parâmetros que se relacionam com distâncias, ângulos e regras, como “conectado a, paralelo a, distante d” (ANDRADE e RUSCHEL, 2009). Para representação mais rigorosa e detalhada dos passos de construção de uma obra, adota-se a modelagem orientada à objetos, onde cada objeto é caracterizado e, posteriormente, organizados e agrupados por semelhança e inseridos ao modelo principal.

Dentre os preceitos estabelecidos da prática do BIM, Santos (2012) cita a Modelagem Paramétrica como um critério essencial que o modelo deve possuir para se considerar como tal. Os sistemas BIM se utilizam modelos paramétricos de elementos construtivos de uma edificação e permitem o desenvolvimento de alterações de forma dinâmicas em um modelo digital da mesma, sendo refletidas de forma imediata em todas as pranchas de desenhos, tabelas de orçamento e especificações (COELHO et al., 2008). Dessa maneira, as propriedades e elementos que representam a realidade da obra, faz com que todos os setores envolvidos possam alimentar o modelo e gerar um projeto virtual preciso. A partir de então, com um nível de detalhamento do projeto, reduz-se o risco e cria-se melhores perspectivas para a gestão da construção (RUIZ, 2009; SAKAMORI, 2015).

2.1.3. LoD (level of Detail)

O nível de detalhamento de um modelo, do inglês LOD (*Level of Detail*), está diretamente relacionado à forma como o BIM será usado e a sua funcionalidade (projetiva, manutenção, reforma ou demolição), devendo observar diferentes características das edificações: o tipo de uso (residencial, comercial, serviços, etc.), a idade (nova, existente ou histórica) e o proprietário (privado, associações, autoridades, universidades) (VOLK; STENGEL; SCHULTMANN, 2014).

O LoD é classificado em uma escala que vai de 100 a 500, variando a quantidade de informações incluídas no modelo (Pärn, Edwards e Sing, 2017). Em resumo, o LOD100 possui uma baixa definição do projeto enquanto que o LOD500 se trata do modelo *as-built* (como construído) em alta definição, contendo ainda características físicas e funcionais da edificação (BIAGINI et al., 2016). Porém ressalta-se que não existe um modelo de um projeto com determinado nível de

desenvolvimento, tendo em vista que os mesmos conterão elementos e montagens em diferentes níveis de desenvolvimento.

QUADRO 1 – Níveis de detalhamento (ND) do BIM.

LoD	Descrição
100	O elemento do modelo é representado como um símbolo ou outra representação genérica , mas não satisfaz os requerimentos para o ND 200. Equivale a representação gráfica quase sem detalhes ou informações além da forma da construção, detalhes do terreno e outras informações preliminares.
200	Representado como um sistema genérico , objeto, ou montagem com quantidades aproximadas, tamanho, forma, localização e orientação. Nesta etapa, informações não-gráficas também podem ser anexadas ao elemento do modelo.
300	Representado como um sistema específico , objeto ou montagem em termos de quantidade, tamanho, forma, localização e orientação, além de informações não-gráficas. Nesta etapa, tem-se o anteprojeto aprovado, logo começa-se a fazer o detalhamento dos projetos executivos, estruturais, arquitetônicos, memórias de cálculo, maquetes e do orçamento, objetivando a compatibilização de todas essas etapas.
400	Sistema específico em termos de tamanho, forma, localização, quantidade e orientação, interfaces com outros sistemas construtivos, com detalhamento, informações para pré-fabricação e detalhes de instalação , bem como informações não-gráficas. Nesta fase, trabalha-se com planejamento, cronograma físico-financeiro, documentação legal, e detalhes necessários para a execução.
500	Representação de campo, verificada em termos de tamanho, forma, localização, quantidade, orientação e informações não-gráficas. Por fim, corresponde ao modelo como será construído, quando todos os custos, fornecedores e especificações para cada material já estão inseridos no projeto.

Fonte: Adaptado de BIMFORUM, 2013.

O LoD foi padronizado pelo Instituto Americano de Arquitetos (*American Institute of Architects – AIA*) e incluído na norma americana de BIM, o *NBIMS Guide* elaborado pelo *National Institute Of Building Sciences BuildingSMART Alliance* conhecido como *BuildingSMART*. Na Figura 1 são mostrados exemplos dos diferentes níveis de detalhamento para uma edificação.

Figura 1 - Evolução do projeto em diferentes níveis de lod.



Fonte: BIMLAB, 2018.

2.1.4. Modelagem de edificações via BIM

Nos últimos anos houve uma crescente demanda no ramo AEC pelo uso de modelagem BIM, por causa dos benefícios comprovados e real economia de recursos durante todo processo: projeto, planejamento e construção de edificações. (Volk et al., 2013). Evidencia-se ainda a importante contribuição da Tecnologia da Informação (TI) para a qualidade dos projetos (CRUZ, 2004), sabendo que os softwares permitiram uma maior facilidade no cálculo, maior precisão, ousadia e redução de tempo de desenvolvimento (HIPPERT & ARAUJO, 2010). Sendo assim, a busca pelo refinamento dos projetos ajuda a fomentar a tecnologia BIM, bem como disseminar esta tecnologia pela sociedade.

Dentre os benefícios desta solução, cita-se a consistência e visualização do modelo, previsão de custos mais acurada, detecção de problemas e melhor colaboração das partes interessadas. Porém a inserção de uma nova tecnologia, considerada disruptiva gera impacto no setor, trazendo consigo alguns desafios, como a mudança na forma de trabalho, resistência aos sistemas e interfaces dos novos softwares e mais tempo necessário para adaptação dos profissionais ao novo processo. (Volk et al., 2013).

No geral, o emprego do BIM na indústria de construção foi impulsionado pelo desenvolvimento de novas ferramentas CAD, apesar de se saber que o BIM não se limita a isto. Hilgenberg et al. (2012) colocam que os primeiros softwares lançados no mercado na década de 80, dando destaque ao Allplan e o ArchiCAD. Recentemente, outros softwares comerciais mais específicos foram lançados, como o Bentley, Solibri, Robot, Navisworks, Trimble Vico Office e o Revit. Porém existem ainda algumas ferramentas livres, como o Blender 3D, SketchUp BIM Tools e o VisualPV3D, que são gratuitas e ocupam menos espaço no disco rígido.

Uma das dificuldades perante a comunidade acadêmica é que muitos ainda mantinham a visão de apenas “modernizar”, porém um número crescente de universidades já se adequou a essa nova visão projetual. No Brasil, o assunto BIM começou a ser repercutido a partir dos anos 2000, principalmente, após as revistas AU e Técnica, de Arquitetura e Urbanismo e Engenharia Civil, respectivamente, dedicarem, em 2011, edições especiais para discussão desse novo paradigma (MENEZES, 2011).

2.2. RECONSTRUÇÃO DE TELHADOS

Grande parte dos estudos relativos à modelagem de edificações tem os telhados como objeto de estudo. Vê-se que para isto, os pesquisadores se utilizam de diferentes fontes, como lidar aéreo, ortofotos e imagens de satélites, principalmente, a combinação deles. Autores como Vosselman e ijkman (2001); Park et al. (2006) e Haala et al. (1998) utilizaram a combinação de dados LiDAR com plantas baixas de edificações. Já com a combinação de dados LiDAR e imagens aéreas, cita-se Rottensteiner et al. (2004); Awrangjeb et al. (2012).

Em relação à outras metodologias, Orthuber e Avbelj (2015); Lafarge et al. (2010); Rychard e Borkowski (2016) criaram um banco de dados com predefinições relativas à forma dos telhados; Jochem et al. (2012) utilizaram um método baseado em crescimento de regiões em uma grade raster; Sampath e Shan (2010), também utilizara crescimento de regiões em uma estrutura TIN; Rottensteiner e Briesse (2003) trabalharam na detecção de planos dos telhados; Kim e Shan (2011) focaram na análise de arestas; Kabolizade et al. (2012) e Sabariego (2018) utilizaram dados LiDAR aplicando algoritmos genéticos.

O uso de imagens de satélites como subsidio para estudos de telhados pode ser inviável devido à resolução espacial obtida. Em adição, as imagens de aerolevantamentos, apesar de possuírem resolução espacial para identificação de telhados, necessitam de uma série de processamentos e correlações entre as imagens para se tornarem apropriadas para trabalhos geométricos. Por fim, o dado LiDAR por si só já é coletado vinculado às coordenadas tridimensionais, obtendo informações de posição de forma direta.

Em relação ao estado da arte acerca de estudos voltados para a modelagem de telhados, encontram-se diferentes aplicabilidades, como exemplo:

- i. Cadastro técnico (Cadastro 3D): Fonseca et al. (2016);
- ii. Dinâmica imobiliária: Oliveira (2014);
- iii. Expansão, planejamento e política urbana: Ferreira (2014);
- iv. Estudos de potencial fotovoltaico e coleta de água pluvial: Amisse (2016);
- v. Fins arquitetônicos/BIM: Souza et al. (2015), Dezen-Kempter et al. (2015).

2.3. RECONSTRUÇÃO DE FACHADAS USANDO LIDAR

O levantamento das formas arquitetônicas de uma edificação é considerado um processo de medição e registro das formas do objeto, visando à geração de uma representação gráfica. Logo, representar com a maior precisão requerida os elementos considerados mais significativos é indispensável para a caracterização e o reconhecimento da edificação (DOCCI; MAESTRI, 1987).

A grande parte da produção científica que descreve a utilização de LiDAR para esta finalidade se volta principalmente para a detecção de telhados via LiDAR aerotransportado, havendo menos publicações que versam sobre a modelagem específica de fachadas de edifícios a partir de dados de Laser Scanner Terrestre. Dentro dessa pequena parcela, a maioria dos trabalhos é voltada para a reconstrução de monumentos históricos para fins de arquivamento, monitoramento e restauração.

Em um primeiro esforço utilizou-se a geometria obtida de levantamentos LiDAR aerotransportado com texturas de fotografias. Por exemplo, Frueh et al. (2004) combinaram imagens aéreas oblíquas e um modelo 3D criado a partir da dados LiDAR, projetando a imagens no modelo 3D. O modelo 3D era constituído por uma rede triangular e para cada triângulo no modelo, a melhor imagem foi selecionada tendo em conta parâmetros como a resolução da imagem, a orientação da normal ao plano da fachada as oclusões e a coerência com triângulos vizinhos. O conceito foi também explorado por Rau et al. (2012).

Deveau (2006) também propôs a combinação de dados LiDAR com fotografias aéreas, mas neste caso utilizando LiDAR terrestre. A nuvem de pontos foi usada para orientar as imagens para depois executar a segmentação semi-automática das feições nas fotos e, por fim, gerar um modelo. De forma muito similar, Böhm et al. (2007) produziram um modelo mais grosseiro com os dados Laser Terrestre para depois refinar estes modelos com informações complementares como portas e janelas obtidas nas imagens fotográficas previamente orientadas.

Pu e Vosselman (2009) afirmaram que a baixa densidade de pontos nas fachadas dificulta a extração de detalhes das nuvens de pontos. Por isso, propuseram uma metodologia para a modelagem semi-automática de fachadas através de dados laser terrestre e imagens fotográficas que consistia basicamente na geração de um modelo 3D mais grosseiro usando informações semânticas, como a posição relativa de vias.

A melhora dos sistemas de LiDAR terrestres possibilitaram o aumento da densidade de pontos na superfície das fachadas, o que motivou ao uso cada vez mais intenso das nuvens de pontos como fonte de dados. Por exemplo, Yang et. al. (2013) propuseram um método de extração semiautomática de *footprints* da fachada do edifício utilizando nuvens de pontos obtidas por um sensor LiDAR acoplado em um veículo (mapeamento móvel). Este método gera uma imagem georreferenciada de uma nuvem de pontos LiDAR móvel e depois usa o processo de segmentação para extrair áreas de contorno que contêm pontos de fachada de edifícios, pontos de árvores e pontos de outros objetos. A partir dos pontos em cada área de contorno, uma classificação baseada no método de análise de componentes principais (PCA) foi adotada para identificar objetos de construção. Em seguida, os pontos em um objeto de construção são segmentados em diferentes planos usando o algoritmo de consenso de amostra aleatória (RANSAC). Para cada edifício, os pontos nos planos da fachada são escolhidos para calcular a direção e, finalmente, os *footprints* de diferentes fachadas do edifício são refinados, harmonizados e unidos.

Zhang (2018) desenvolveram um algoritmo misto para a extração de fachadas de edifícios a partir de nuvens de pontos obtidas com laser terrestres. Inicialmente procederam com a construção de um índice misto do Kd-OccTree e o cálculo dos vetores normais de nuvens de pontos usando a análise de componentes principais (PCA). Ainda usando a lógica *fuzzy* e a transformação de *Hough* generalizada (GHT) conseguiu-se classificar os pontos de fronteira no plano e acelerar o processo convencional de extração de fachadas de edifícios.

A maior densidade de pontos permite também detectar e modelar feições e detalhes presentes em fachadas. Belton e Lichti (2006) desenvolveram um método de análise estatística para classificar os pontos que definem as feições de fachadas. Foram determinados os autovetores da matriz variância-covariância de uma vizinhança na nuvem de pontos para definir a orientação de cada ponto. A partir disso, se faz possível classificar os pontos em pontos de fronteiras, pontos de bordas das superfícies internas e pontos de superfícies. Da mesma maneira, Briese e Pfeifer (2008) propuseram uma abordagem para a modelagem de edificações baseada principalmente na detecção de características lineares de dados de laser terrestre. Primeiramente, as características lineares foram detectadas automaticamente na nuvem de pontos, como cantos, para depois reconstruir linhas significativas de

maneira semi-automática, obtendo uma representação vetorial dos detalhes arquitetônicos da fachada.

Zhang et al. (2003) trouxeram um método utilizando o MDS (Modelo Digital de Superfície) de alta precisão advindos de pontos LiDAR e imagens de textura dos telhados e fachadas dos edifícios, a fim de realizar a reconstrução 3D sem a criação de modelos off-line. Nesse estudo foi introduzido um método hierárquico de segmentação de edifícios, onde o posicionamento aproximado dos edifícios foi realizado pelo conjunto de níveis em um MDS global e, em seguida, todas as regiões dos edifícios foram processadas separadamente pelo método de oclusões de textura aleatória para segmentação.

2.4. SEGMENTAÇÃO DE FACHADAS

A segmentação de uma imagem ou nuvem de pontos refere-se ao particionamento dos dados em segmentos que possuam características homogêneas e expressivamente distintas dos demais segmentos (Oliveira, 1999). Sendo assim, torna-se uma fase importante no processo de reconstrução tridimensional das fachadas de edifícios, como exemplo, por meio da identificação de pontos pertencentes ao mesmo plano (GONZALEZ e WOODS, 2000 & Ferreira, 2014).

Em processamento digital de imagens os critérios de homogeneidade estão relacionados à resposta radiométrica da imagem, ao passo que, no caso da nuvem de pontos oriunda de um levantamento a laser, está geralmente relacionado à posição, que podem descrever uma superfície curva ou um segmento plano (BOULAASSAL, et al. 2009). No que tange aos estudos acerca de métodos de segmentação de dados LiDAR, os mesmos podem ser agrupados em três grandes grupos (SAPKOTA, 2008): um baseado no agrupamento de feições (*clustering of features*), outro baseado no crescimento de regiões (*surface growing*) e, por fim, outro por ajustamento de modelos (*fitting*).

2.4.1. Segmentação baseada em agrupamento por feições (*clustering of features*)

A segmentação baseada em agrupamento por feições é o processo de agrupar pontos com propriedades semelhantes em um único cluster. Nesse método as medidas representativas chamadas de feições são específicas para cada ponto, baseando-se nas características geométricas de sua vizinhança e radiométricas, quando disponíveis. Essas feições geralmente podem incluir, além da posição de cada ponto, o vetor normal à superfície neste local, e o valor da intensidade do retorno. Sendo assim, constrói-se um espaço multi-dimensional com estes descritores para identificar grupos de regiões com características similares e, assim, segmentar partes das fachadas e seus elementos (Sapkota, 2008).

Por exemplo, Filin (2002) usou quatro descritores para cada ponto: os parâmetros do plano ajustado à sua vizinhança (3 valores) e a distância relativa entre o ponto e sua vizinhança. Neste espaço 4D foram identificadas as características mais relevantes que permitem formar grupos utilizando a técnica de classificação não supervisionada para depois efetuar um novo processo de agrupamento, mas desta vez no espaço 3D das coordenadas espaciais. Um método similar é proposto em Filin e Pfeifer (2006), os que realizaram o agrupamento com o método de vizinhança adaptativa de inclinação baseado em um critério de distância e o conteúdo geométrico da nuvem de pontos para detectar as superfícies planas. O método limita-se a segmentar apenas formas planas.

Além disso, a análise de fachadas de edifícios tem sido ativamente estudada e vários métodos têm sido propostos na visão computacional aplicada ao processamento de imagens, sendo que a maioria destes operam em nível por pixel ou super pixel, resolvendo o problema da segmentação de imagem (Mathias et al., 2016; Cohen et al., 2014).

Embora o método de agrupamento seja semelhante ao crescimento da região e ambos sejam baseados em pontos de agrupamento sob restrições comuns, uma das principais vantagens do agrupamento por feições sobre o método de crescimento da região é que nenhum ponto ou região de semente é necessário para iniciar a caracterização ou agrupamento. De acordo com Zolanvari et al. (2018), o armazenamento em cluster é computacionalmente caro para conjuntos de dados 3D e altamente influenciado pela densidade e qualidade de dados, porque o método deve

determinar se cada ponto satisfaz ou não os critérios de agrupamento. Além disso, a abordagem pode falhar em segmentar corretamente as arestas, pois os pontos de borda podem atender aos requisitos de mais de um cluster, especialmente se os critérios forem baseados em densidade de pontos ou distribuição de pontos, como em Aljumaily et al., 2015 e Aljumaily et al. al., 2017.

2.4.2. Segmentação baseada no crescimento de regiões (*surface growing*)

Este algoritmo fundamenta-se na escolha de um ponto e, em sequência, no agrupamento progressivo de pontos vizinhos com características similares, baseado em certos critérios. De acordo com Vosselman et al. (2004) este método de segmentação possui basicamente as etapas de identificação do ponto ou superfície semente e o crescimento da região do mesmo.

A chamada superfície semente consiste em um agrupamento de pontos vizinhos que se ajustam a um plano ou parte de um cilindro ou esfera. A partir disto, os pontos vizinhos que se ajustam à superfície definida são agregados até atingir as bordas desta superfície. Os critérios para aceitar um ponto podem ser baseados na proximidade do ponto, na planaridade local ou na superfície suavizada.

Exemplos de uso do método de crescimento de regiões são encontrados em Woo et al. (2002) e Vo et al. (2015) que se utilizaram de *octrees* para agrupar *voxels*. Nardinocchi et al. (2003) combinaram o método de crescimento de região com uma classificação baseada em regras hierárquicas, com a finalidade de levar em consideração as propriedades geométricas e topológicas dos segmentos gerados. A prática mais usada é descrita em Tovari e Pfeifer (2005) e consiste em utilizar como descritores as componentes do vetor normal à nuvem em cada região. Os autores concluíram que aplicando-se o método de agrupamento *K-nearest*, é possível agrupar pontos vizinhos e com a mesma orientação de forma a modelar os planos que formam a fachada.

A descrição da normal à superfície pode ser obtida ajustando um plano à vizinhança ou através do tamanho dos autovalores das coordenadas tridimensionais dos pontos em uma dada vizinhança, como é feito por Verma et al. (2006). Isto permite separar planos de bordas com relativa facilidade.

Segundo Zolanvari et al. (2018), embora o crescimento de regiões tenha sido amplamente utilizado em muitos trabalhos de segmentação de ponta (por exemplo, Deschaud e Goulette, 2010; Wang e Tseng, 2011; Nurunnabi et al., 2012), o uso da abordagem sempre depende em pelo menos um critério pré-definido, que desafia sua robustez como uma solução universal.

2.4.3. Segmentação por ajustamento de modelos (*fitting*)

Este método se baseia na prerrogativa de que as edificações são compostas por fragmentos de planos, sendo essencial a extração de primitivas geométricas, como planos, cilindros e esferas, a partir do conjunto de pontos LiDAR (Schnabel et al., 2007). Neste sentido, tal método busca ajustar as figuras geométricas sobre a nuvem de pontos e, em sequência, ajustar à primitiva e assim rotular como segmento. Dentre os métodos mais relevantes na extração de primitivas geométricas tem-se a transformada 3D de Hough e o RANdom SAmple Consensus (RANSAC).

Abordagens baseadas em ajustes geométricos utilizam principalmente variantes dos métodos RANSAC (*Random Sample Consensus*), como inicialmente introduzido por Fischler e Bolles (1981), para segmentar fachadas construindo planos ou linhas em áreas de nuvem de pontos mais densas. Segundo Medina (2012) o algoritmo de RANSAC se trata de um algoritmo robusto, o que garante solidez nos resultados mesmo na presença de ruídos.

Geralmente a normal estimada da superfície em cada ponto é usada como fonte de dados para verificar se é possível ajustar um plano à região. Outra opção é ajustar superfícies curvas, porém isto demanda maior esforço. O problema é que muitas vezes as fachadas contêm curvas que não podem ser modeladas simplesmente por planos, ou então demandam o uso de um número grande de pequenas regiões planas. Por isto, Yang e Förstner (2010) aplicaram um algoritmo baseado em RANSAC integrado com um comprimento mínimo de descrição para definir manualmente o número de planos ajustados em uma nuvem de pontos.

A transformada de Hough também pode ser usada para ajustar formas à superfície da fachada. A Transformada de Hough foi originalmente introduzida para reconhecer linhas em imagens e, posteriormente, foi estendida em 3D para identificar posições de planos arbitrários (Maas e Vosselman, 1999; Vosselman e Dijkman, 2001), cilindros (Tarsha-Kurdi et al., 2007) e esferas (Rabbani et al., 2005). Vosselman

e Dijkman (2001) trabalharam com o algoritmo da transformada de Hough para extrair pontos coplanares, obtendo as faces dos planos dos telhados através de processos de fusão e expansão dos segmentos iniciais. Outro exemplo de estudo foi a aplicação da transformada 3D de Hough aplicada à segmentação de dados laser terrestre em uma cena industrial por Vosselman et al. (2004). Hernández & Marcotegui (2009) descreveram um método automático para segmentação de imagens de fachadas de edifícios, baseado no acúmulo de gradientes de cor direcionais e marcadores de cores. Além disso, utilizaram a transformada de Hough para retificação automática da imagem.

3. MATERIAIS E MÉTODO

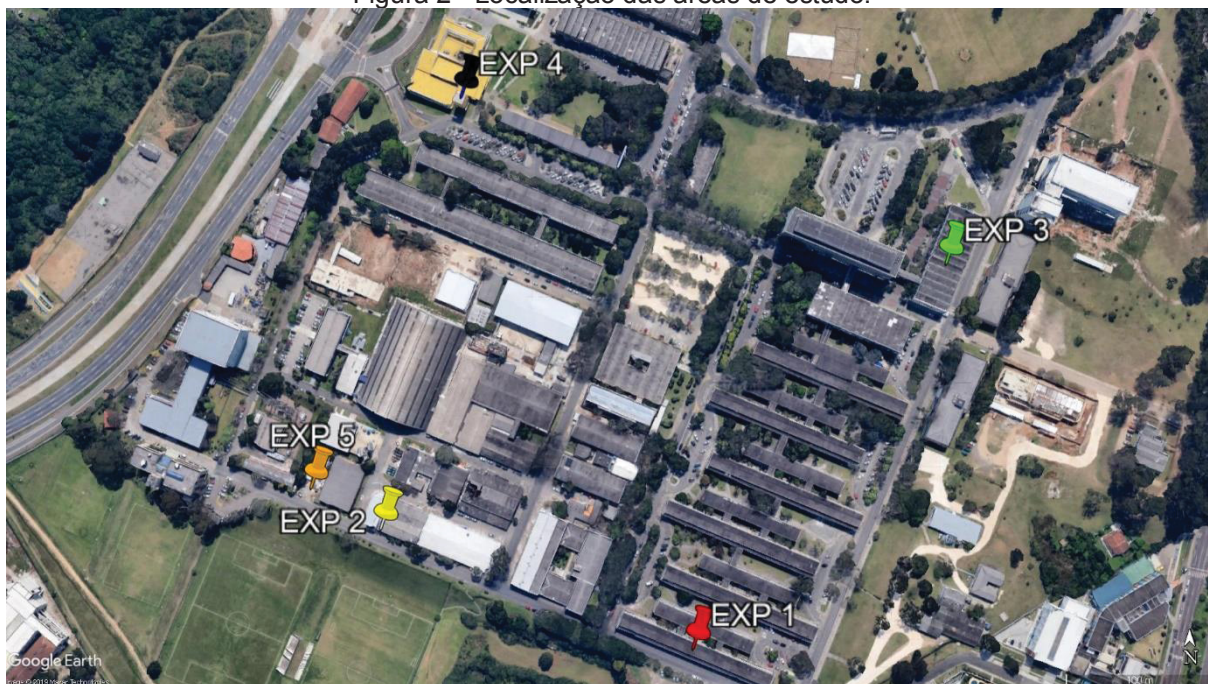
Neste capítulo são apresentados os materiais e o método que serão utilizados para a realização do trabalho visando a modelagem tridimensional de edificações.

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Área de estudo

A área de estudo encontra-se no campus do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), conforme apresentado na Figura 2. Os dados utilizados foram adquiridos em diferentes intervalos de tempo e por dois métodos distintos: um levantamento aéreo e outro terrestre.

Figura 2 - Localização das áreas de estudo.

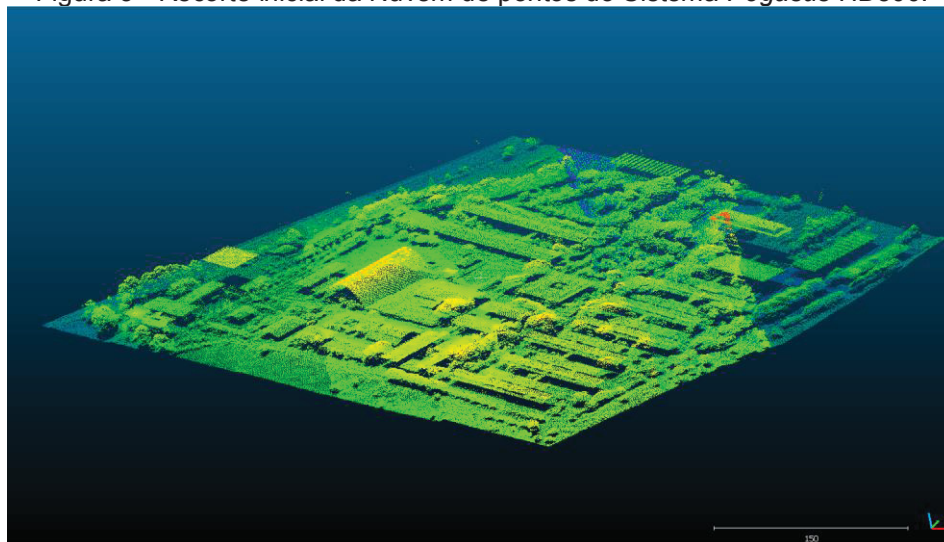


Fonte: O autor (2019).

O aerolevantamento laser foi realizado em agosto de 2012 utilizando o sensor *Pegasus* HD500 e disponibilizado pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Lactec. Inicialmente foi recortada e filtrada uma nuvem de pontos do campus universitário Centro Politécnico da UFPR e parte de bairros ao seu entorno,

possuindo aproximadamente 1,98 km²; 5,64 km de perímetro e 9.991.480 pontos, como é mostrado na Figura 3.

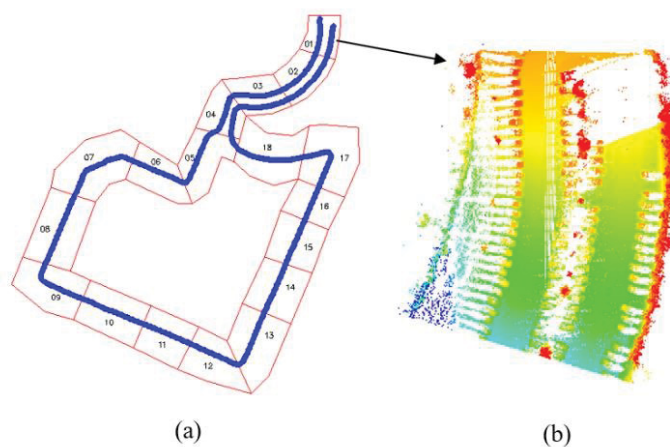
Figura 3 - Recorte inicial da Nuvem de pontos do Sistema *Pegasus* HD500.



Fonte: O autor (2019).

O levantamento terrestre foi feito em abril de 2014, utilizando o Sistema Laser Terrestre Móvel (MTLS) Suíço *Pegasus* One, pertencente a empresa Leica Geosystem. Os dados foram cedidos pela empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A para a UFPR para fins acadêmicos. O percurso feito pelo automóvel seguindo a trajetória mostrada na Figura 4, numa velocidade de 30 km/h (velocidade permitida da faixa), obtendo uma densidade média de pontos de 2.400 pontos por m².

Figura 4 - Percurso e área levantada pelo MTLS.



Fonte: Peixoto (2016).

3.1.2. Sistema Laser Terrestre móvel *Pegasus One*

O sistema móvel suíço *Pegasus One*, pertencente a empresa Leica Geosystem é composto por um sensor LiDAR, um receptor GNSS, um IMU, um DMI (*Distance-Measuring Instruments*), seis câmeras digitais métricas, instaladas nas quatro laterais do veículo, e um odômetro. Tanto o equipamento quanto o levantamento dos dados foram cedidos pela empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A para a UFPR para fins acadêmicos.

Figura 5 - Componentes do sistema *Pegasus One*.



Fonte: Adaptado Pegasus Roadway Presentation (2015).

Por ser *plug and play*, o sistema *Pegasus One* apresenta o diferencial de possuir instalação rápida e combinada com um software de fácil operabilidade, evitando que seja necessário um longo treinamento antes de um levantamento. Além disso, o sistema coleta um milhão de pontos/segundo, 12 fotos/segundo, operando numa velocidade normal de 60 km/h.

Todo o conjunto do sistema *Pegasus One*, que possui aproximadamente 40kg, foi instalado em um automóvel utilitário da marca Fiat modelo Dobló e necessitou apenas de barras transversais para a sustentação do equipamento. A fim de não impedir a varredura do sensor em 360 graus, o sistema foi posicionado num ângulo de 40 graus em relação à base do teto do veículo.

3.1.3. Sistema LiDAR aéreo ATML *Pegasus* HD500

Neste estudo os dados utilizados são provenientes do sistema *Pegasus* HD500 da fabricante Optech Inc., Ontario-Canadá, adquirido pelo Lactec, conforme Figura 6.

Figura 6 - Sistema ALTM *Pegasus* HD500.



Fonte: Optech (2019).

O modelo ALTM *Pegasus* HD500 é caracterizado pela união de duas tecnologias desenvolvidas para o aumento da Frequência de Operação dos sistemas LiDAR (*Pulse Repetition Frequency - PRF*), que representa o número de pulsos Laser emitidos por segundo. Tais tecnologias são a captura de múltiplos pulsos no Ar - MPiA e sistema multicanais, característicos do Sistema Discreto que se trata de um sistema equipado com dois canais de 250 kHz máx. de frequência cada um para o pulso Laser. Além disso, possui ainda uma componente para a digitalização da *Waveform*, chamado de *Digitizer*. Abaixo se encontram mais informações acerca desse sistema.

QUADRO 2 - Características de desempenho do *Pegasus* HD500.

ESPECIFICAÇÃO	CARACTERÍSTICAS
Modelo do equipamento	ALTM PEGASUS HD500
Fabricante do equipamento	Optech Incorporated
Ano de fabricação	2012
Sistema Inercial (IMU) / GPS	Applanix AV-POSView (Applanix Corporation)
Receptor GNSS	220-channel dual frequency GPS/GNSS/Galileo/L-Band
Software da operação de voo	Optech FMS Planner + FMS Nav
Software de processamento	Optech LMS

Frequência de operação (PRF)	Variável 100 – 500 kHz
Frequência de varredura	Variável 0 – 140 Hz efetivo
Ângulo de varredura total (FOV)	Variável de 0° a $\pm 65^\circ$
Tipo de coleta de dados	Multipulso (múltiplos retornos) e modo <i>Full-Waveform</i>
Intensidade	Até 4 retornos de Intensidade para cada pulso, incluído ou último – Registro de Intensidade 12 bits
Divergência do pulso	0.25 mrad
Comprimento de onda do Laser	1064 nm (classe IV- FDA CFR 21)
Dimensões e peso	Sensor : 630x540x450mm ; 65kg Control rack : 650x590x460mm ; 46kg
Altura operacional	300 – 2.500 m (nominal) (3.500 m operacional)
Acurácia altimétrica	< 5 - 15 cm, 1 σ (12 cm para altitude de 1.000 m)
Acurácia planimétrica	1/5.500 x altitude, 1 σ (18 cm para altitude de 1.000 m)
Câmara digital	D8900 : 8,900 pixels across by 6,700 pixels Sistema gerenciamento DiMac $f = 70,4562\text{mm}$

Fonte: OPTECH (2015)

3.1.4. Bibliotecas e softwares utilizados

O conjunto de bibliotecas e softwares usados para o desenvolvimento deste trabalho foram:

- I. Microcomputador desktop com processador Intel Core™ Duo CPU, 4 Gb de RAM e 260 Gb de espaço em disco.
- II. LiDAR *Mapping Suite* (LMS): extração e processamento dos dados brutos do ATML *Pegasus* HD500.
- III. *MicroStation* para executar a funcionalidade *TerraSolid* com o pacote de módulos *TerraScan*: utilizado para visualização da nuvem de pontos, consolidação das nuvens de pontos únicas, filtragem das nuvens de pontos, recorte de regiões e classificação da nuvem de pontos. O *CloudCompare* pode ser usado como solução livre para realizar procedimentos similares.

- IV. *Sketchup*: modelagem tridimensional da edificação.
- V. Os equipamentos e softwares utilizados no processamento da nuvem de pontos do TLS podem ser encontrados em Peixoto (2016).

3.2. MÉTODO

A modelagem de um prédio, neste estudo, consta de duas etapas que lidam com duas fontes de dados: um levantamento de LiDAR terrestre móvel e um levantamento de LiDAR aerotransportado. Embora os dois sejam levantamentos LiDAR, seus produtos apresentam diferenças significativas no que diz respeito à densidade da nuvem de pontos e à perspectiva. Por este motivo, a metodologia utilizada se divide em três etapas: modelagem de fachadas a partir do levantamento terrestre, modelagem dos telhados usando os dados do levantamento aéreo e finalmente a integração dos resultados em um modelo único. Estas etapas são apresentadas a seguir.

3.2.1. Pré-processamento do levantamento terrestre

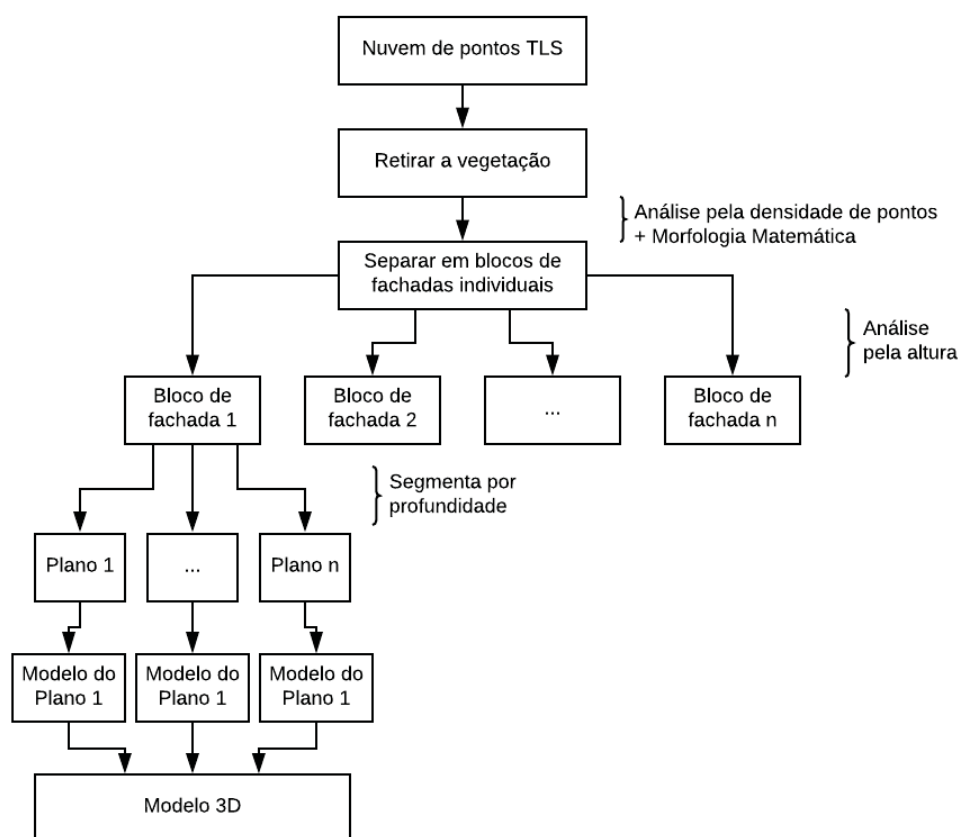
Na primeira etapa, correspondente ao levantamento, foi realizada a varredura Laser terrestre no Campus Politécnico da Universidade Federal do Paraná para a aplicação da metodologia proposta. Em seguida, a nuvem de pontos foi gerada conforme a parametrização estabelecida pelo software *Automatic Post Processing*®. O formato dos arquivos da nuvem de pontos é o LAS, que se trata de um formato de arquivo binário para manipulação de dados tridimensionais. Esta fase é descrita em Peixoto (2016).

O pré-processamento inclui o recorte da nuvem de pontos deixando apenas a área das edificações que serão modeladas. Este processo não é o principal foco do projeto, por isso esta etapa será executada com métodos já conhecidos e disponíveis em programas comerciais. Nesta dissertação, as áreas de estudo foram definidas a partir do recorte manual da nuvem de pontos utilizando o software *CloudCompare*.

3.2.2. Modelagem de fachadas

Antes de efetuar a segmentação dos elementos arquitetônicos de uma fachada é necessário extrair a fachada da nuvem de pontos, separando-a de outros elementos presentes na varredura, como vegetação, outros prédios ou pessoas. Por este motivo, a metodologia proposta, mostrada na Figura 7, apresenta várias etapas antes de seguir para a segmentação propriamente dita.

Figura 7 - Organograma da metodologia.



Fonte: O autor (2019).

A seguir se encontram detalhadas as principais etapas do método proposto, que são:

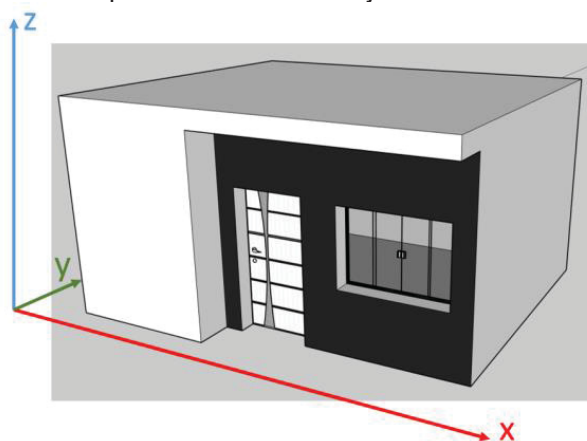
- Orientação da nuvem de pontos;
- Redução dos pontos relativos à vegetação;
- Separação de blocos de fachada;
- Separação em planos de fachada;
- Modelagem da fachada.

A) Orientação da nuvem de pontos laser terrestre

Inicialmente, deve-se realizar a orientação da nuvem de pontos, de forma a torná-la perpendicular em relação ao sistema de coordenadas (coordenada X) do Laser Scanner Terrestre, facilitando a manipulação dos dados. Levando em consideração que a medição dos dados é realizada utilizando um sistema geodésico de coordenadas, por exemplo, N,E,H, vê-se que a edificação, pode não estar necessariamente paralelo a estes eixos coordenados. Isto faz com que se torne mais difícil a modelagem das paredes e fachadas, sendo necessário, como etapa preliminar, girar a nuvem de pontos para um sistema mais apropriado.

Adotando como origem do sistema um ponto à frente da parede, pode-se definir um sistema XYZ, onde o eixo X se encontra paralelo ao plano da fachada, o eixo Y corresponde à profundidade e o eixo Z à altura, conforme Figura 8.

Figura 8 - Rotação da edificação para que o eixo X seja paralelo à fachada, o eixo Y seja a profundidade e o Z seja a altura.



Fonte: O autor (2019).

Isto pode ser atingido aplicando uma transformação de corpo rígido, em relação a Z, conforme a equação 1, visto que os eixos H e Z são paralelos.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(a) & -\sin(a) \\ \sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ N \end{bmatrix} \quad (1)$$

Porém, inicialmente não se tem o ângulo para esta rotação (a), podendo ser encontrado com ajuda dos autovalores e autovetores. Logo, sendo M a matriz de covariância das coordenadas (E,N), uma matriz positiva definida, e I uma matriz

Identidade, os escalares (λ) que satisfazem a equação (3) são chamados de autovalores de M.

$$0 = \text{Det}(M - \lambda * I) \quad (2)$$

Este sistema possui mais de uma solução. O número de autovetores é igual à dimensão da matriz M. Para cada autovalor é então possível calcular um autovetor (v) segundo a equação (4),

$$M * v = \lambda * v \quad (3)$$

A direção do autovetor associado ao maior autovalor é paralela à orientação do prédio, desde que o mesmo não seja quadrado, mas alongado. Então, a nuvem de pontos pode ser girada aplicando-se a transformação:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ N \end{bmatrix} \quad (4)$$

Neste caso, $[v_{11}, v_{12}]$ representa o primeiro autovetor e $[v_{21}, v_{22}]$ o segundo.

B) Redução dos pontos relativos à vegetação

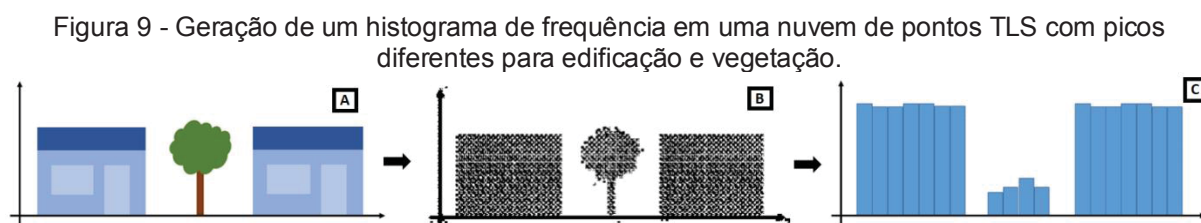
Em um levantamento TLS há a ocorrência de outros objetos além das fachadas, principalmente, vegetações. Para que se consiga isolar as fachadas é necessário primeiramente eliminar a presença dessa vegetação.

Por não possuir uma superfície continua, a vegetação permite que parte dos feixes laser sejam dissipados por entre as folhas, fazendo com que a densidade de pontos na copa seja menor do que em edificações. Na parte baixa da vegetação tem-se apenas o caule, ao passo que nas construções tem-se os objetos desde o chão ao longo de toda sua extensão. Logo, a densidade linear ao longo eixo X é maior para as fachadas do que para a vegetação.

Então, vê-se que é possível separar a vegetação das fachadas analisando a densidade linear. Para isso, gera-se um histograma de frequência ao longo do plano

principal da fachada da edificação, definido como eixo X, para identificar as áreas relativas à vegetação e a edificação. O histograma de frequência é utilizado para contabilizar a quantidade de pontos laser em um intervalo, chamado passo. Para este estudo, foi utilizado um passo de 0,01 m.

Esta situação é ilustrada na Figura 9. Na Figura 9b é mostrada a nuvem de pontos, após a orientação, de duas fachadas e uma árvore (Figura 9a). Na Figura 9c é mostrado o histograma da densidade linear ao longo do eixo X. A frequência de pontos em uma edificação é maior do que em uma vegetação, mesmo havendo a presença de portas e janelas, porque muitos pontos incidem nas paredes que são altamente reflexivas.



Fonte: O autor (2019).

Como os trechos com baixa densidade não correspondem a prédios, pode-se remover estes trechos, assumindo que são vegetação. Para isso, indica-se utilizar um limiar que se iguale a densidade de pontos LiDAR esperada para edificações.

O limiar pode ser calculado com base na informação da densidade de pontos planejada para o levantamento LiDAR. A própria nuvem de pontos fornece informação a respeito da altura da fachada, o valor máximo em Z. Conhecendo-se a densidade de pontos de projeto (d.p.) é possível estimar o número de pontos que deveriam ocorrer em um trecho da parede com comprimento dado (Lt).

$$np = d.p. / Lt \quad (5)$$

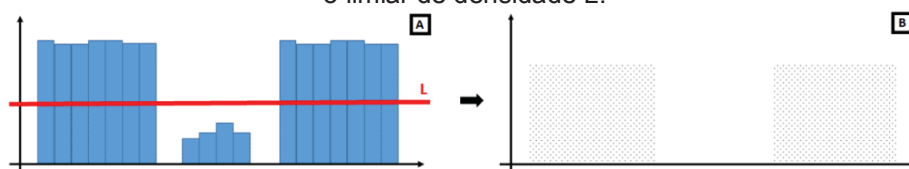
A partir disso, foi definida uma tolerância para conseguir distinguir as áreas construídas das regiões de vegetação. Assumindo que a densidade de pontos para uma área de vegetação seria menor do que a esperada para o levantamento.

$$tol = .1 * np^2 \quad (6)$$

O limiar (*tol*) pode ser definido em função da densidade média do levantamento, onde leva-se em consideração que a reposta na superfície de uma parede é aproximadamente igual à densidade de pontos definida para o levantamento. Porém, é necessário salientar que caso a edificação possua várias portas e janelas de vidro deve-se utilizar um limiar menor, tendo em vista que a densidade em superfícies de vidro é menor do que em superfícies opacas. Além disso, a resolução do levantamento dependerá do equipamento que foi utilizado para coleta dos dados.

Na Figura 10 é mostrado um exemplo de como trechos com valores acumulados ao longo de X abaixo do limiar permitem separar as principais fachadas.

Figura 10 - Remoção da vegetação baseada no histograma de frequência ao longo do eixo X usando o limiar de densidade L.



Fonte: O autor (2019).

C) Separação de blocos de fachada

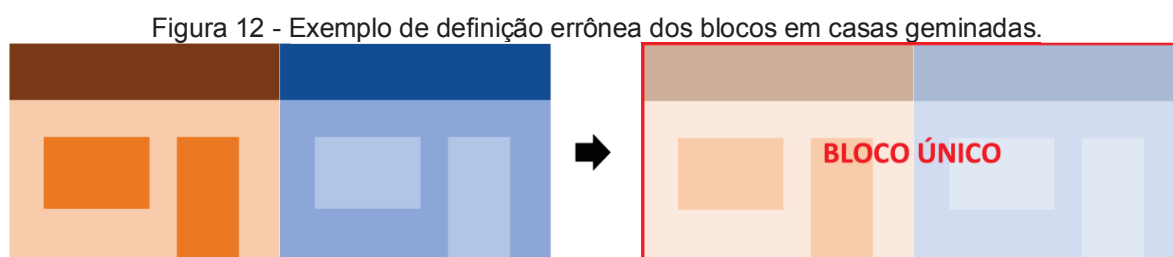
Define-se como fachada cada uma das faces de qualquer construção arquitetônica, podendo ser classificadas em externas (frente, laterais e fundos) e secundárias (internas). A partir disso, são tratadas como Blocos de fachadas as partes relevantes de uma edificação marcadas por uma mudança expressiva de altura. Na Figura 11, tem-se uma edificação que contém 3 níveis de altura, definindo assim 3 blocos de fachadas.

Figura 11 - Divisão de uma fachada em blocos a partir da diferença expressiva de altura.



Fonte: O autor (2019).

Percebe-se que o padrão desta edificação corrobora para uma fácil separação dos blocos de fachadas, porém algumas geometrias podem dificultar a definição dos mesmos. Um exemplo é quando se trabalha com casas geminadas, já que não existe um espaço entre duas construções. Além disso, algumas casas geminadas podem ainda possuir o mesmo padrão de altura, o que resultaria em um bloco único, representando erroneamente duas ou mais edificações como uma única, conforme ilustrado na Figura 12.



Fonte: O autor (2019).

Para definir os blocos são procurados os locais onde ocorrem mudanças bruscas de altura, ou seja, as bordas dos blocos. Para isto é necessário gerar o perfil da nuvem de pontos discretizando a nuvem ao longo do eixo X e adotando para cada trecho o valor da cota máxima no trecho.

A fim de remover pontos espúrios presentes na cena e identificar realmente os vértices da edificação, faz-se uma suavização do perfil utilizando Morfologia Matemática por meio da aplicação da erosão e, em seguida, da dilatação. Os operadores básicos de morfologia matemática aplicam os conceitos lógicos de “E” e “OU” a regiões binárias, sendo uma delas a imagem propriamente dita e a segunda um elemento estruturante, que faz o papel de uma janela móvel, definido pelo usuário.

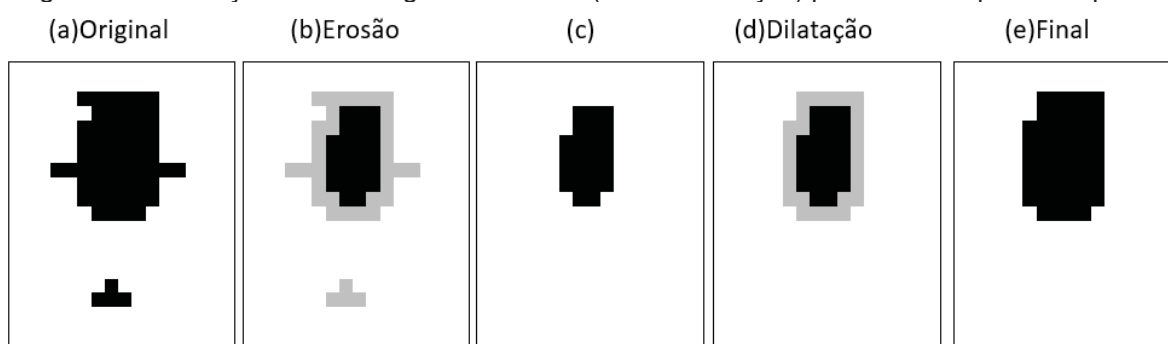
Primeiramente faz-se a erosão da imagem binária. Na erosão o elemento estruturante é deslocado ao longo da imagem em questão e em cada possível posição é verificado se ele é completamente contido no conjunto de pixels ativos da imagem (união). Seu efeito é a diminuição do tamanho dos objetos na imagem e remoção de pequenas anomalias.

Em sequência faz-se a dilatação da imagem erodida. Nesta etapa, o elemento estruturante é de novo deslocado ao longo da imagem e para cada posição é verificado se a interseção entre o elemento estruturante e a imagem não é nula (OU).

Caso não seja nula, o pixel é marcado como ativo. Seu efeito é aumentar o tamanho das regiões na imagem, o que pode fechar alguns espaços vazios e juntar regiões. Deve-se salientar que a dilatação não é a operação complementar da erosão.

Este processo é exemplificado na Figura 13. Na primeira figura (a) é mostrada uma imagem com duas regiões ativas em preto. Na segunda imagem (b) é mostrada em cinza a área que seria erodida por um elemento estruturante 3x3 quadrado. Nota-se que as bordas foram reduzidas e que a segunda região foi eliminada, por ser muito pequena em relação ao um quadrado 3x3. A terceira imagem mostra apenas o resultado da erosão. Na quarta imagem (d) é mostrada, em cinza, o efeito da dilatação da imagem (c). O resultado final aparece na última imagem (e).

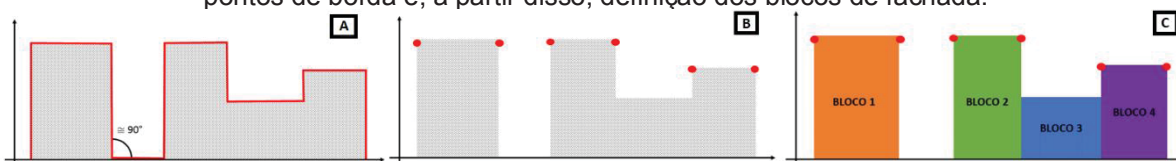
Figura 13 - Utilização de Morfologia Matemática (erosão/dilatação) para remover pontos espúrios.



Fonte: O autor (2019).

Levando em consideração que os pontos de borda são caracterizados por mudanças bruscas no perfil de uma cena, eles podem ser identificados analisando o ângulo das retas que ligam um ponto em questão ao ponto anterior e ao ponto posterior. Caso esse ângulo for agudo, ou seja, próximo de 90° , afirma-se que ali há uma grande variação de altura, logo, o ponto é assumido como sendo uma borda. Além disso, definiu-se um limiar para a variação mínima de altura, a fim de evitar que se criem pequenos blocos baseados em mudanças de alturas não significativas. A Figura 14 apresenta uma sequência dos passos anteriores em imagens.

Figura 14 - Geração de um perfil longitudinal de uma cena com duas edificações para detecção de pontos de borda e, a partir disso, definição dos blocos de fachada.



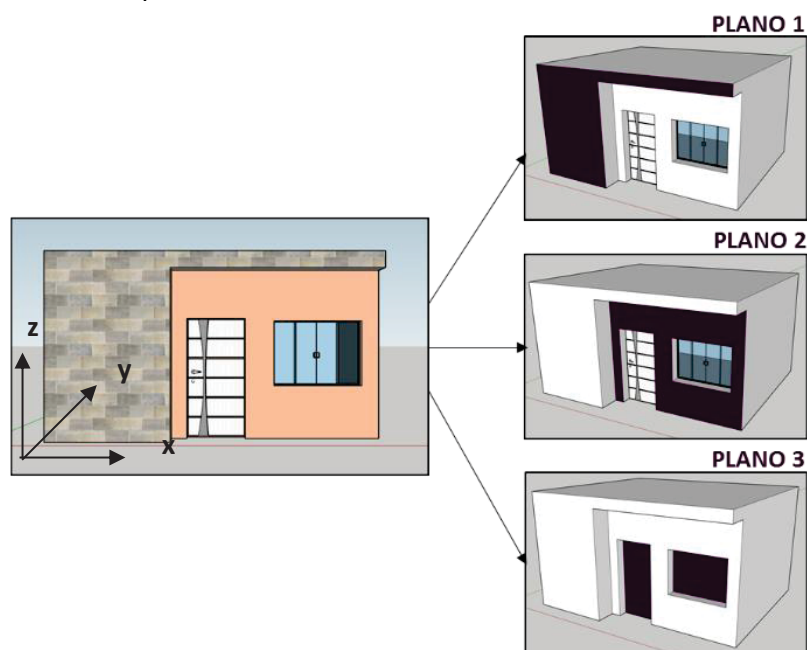
Fonte: O autor (2019).

D) Separação em planos de fachada

Com os blocos já separados, é necessária a definição dos principais planos que compõem a fachada. Uma edificação pode ser considerada, geometricamente, como um objeto poliédrico, e ser apresentada por faces planares (Ferreira, 2014). Mass e Volsseman (1999) descreveram um método para definir faces planas de uma edificação, presumindo que existia uma orientação principal do edifício e que todas as arestas que possuíssem descontinuidades na altura fossem paralelas ou perpendiculares a essa orientação.

Após a rotação, os dados do eixo Y representam a profundidade da edificação. Sendo assim, define-se plano de fachada um plano médio sobre as concentrações de pontos em diferentes níveis de profundidade. Por exemplo, na Figura 15 tem-se uma edificação com elementos relevantes em três níveis de profundidade ao longo do eixo Y, sendo eles o detalhe com textura, definindo o plano 1; a parede lisa, definindo o plano 2; e a porta e a janela, definindo o plano 3.

Figura 15 - Conceito de planos de fachada em uma edificação com três níveis de profundidade.



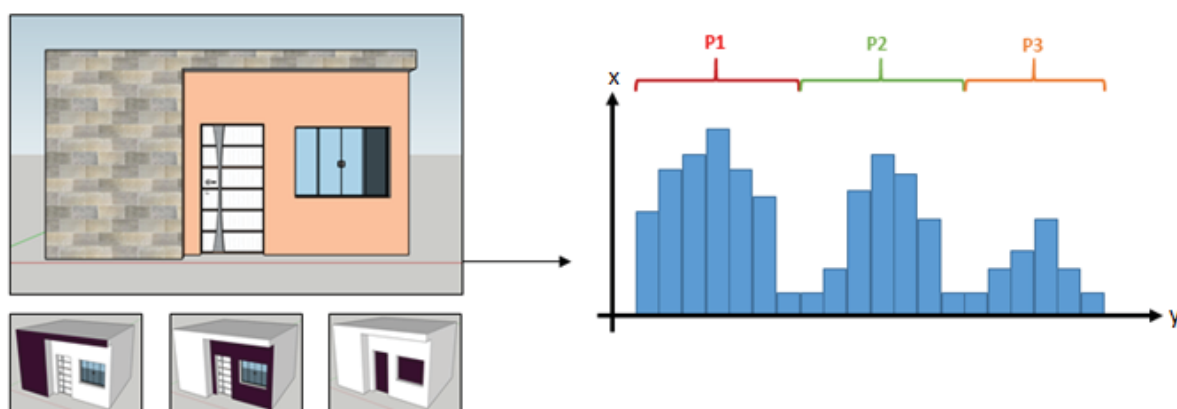
Fonte: O autor (2019).

Para que isso seja possível, cria-se outro histograma de frequência baseando

na densidade da nuvem de pontos, mas desta vez ao longo do eixo Y. Nesta etapa, caso a parede seja composta por um único plano, o histograma será unimodal. Porém, caso a parede seja composta por vários planos, os pontos estarão agrupados em torno da profundidade média de cada plano ao longo do eixo Y. Logo, a presença de vários agrupamentos no histograma decorre da concentração de pontos em diferentes profundidades. Aconselha-se o uso de um curto passo, como 0.05m, a fim de obter um resultado mais detalhado de cada plano.

Por isso, a seguinte etapa será a detecção destes agrupamentos por meio de técnicas de limiarização múltipla. Na Figura 16 é mostrada uma representação gráfica deste conceito. A edificação possui uma parede com textura à frente, outra lisa mais ao fundo e, por fim, outro plano com a porta e a janela. À direita da figura mostra-se o histograma destas profundidades, onde pode-se separar os planos de fachadas a partir dos 3 picos apresentados.

Figura 16 - Geração do Histograma de Profundidade.



Fonte: O autor (2019).

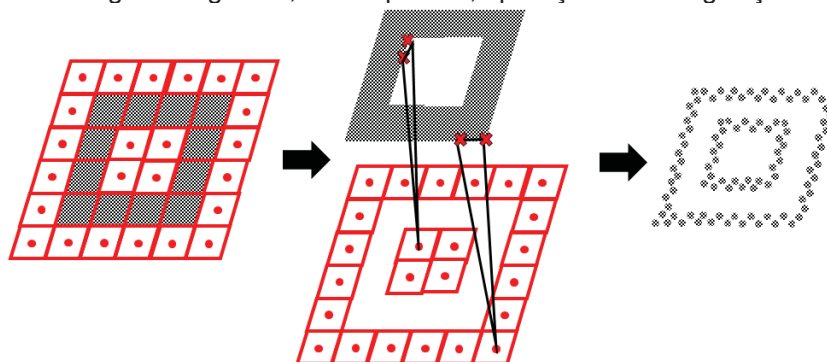
Percebe-se que, por haver maior frequência de pontos nas paredes, devido à solidez e opacidade dos materiais que as compõe, estas regiões possuem maiores picos no histograma. Já em regiões que possuem janelas, principalmente, de vidro, há bastante dispersão de pontos LiDAR, diminuindo a frequência. Logo, os picos representam cada plano e, dessa forma, os pontos correspondentes a cada grupo serão separados e analisados de forma independente.

E) Modelagem da fachada

Com os planos já identificados, inicia-se o processo de modelagem dos mesmos. Nesta etapa é assumido que todos os pontos atribuídos à um plano, possuem a mesma profundidade, ou seja, determina-se a profundidade média do plano que os contém.

Primeiramente, os pontos pertencentes a cada plano são projetados em uma grade retangular e, em seguida, identificadas as células vazias adjacentes à fachada que representam o contorno da edificação e as bordas das aberturas internas, como os vazios causados por janelas de vidro. As coordenadas destes contornos são adicionados à nuvem de pontos considerando as coordenadas X,Z do centro da célula e, posteriormente, atribuindo um valor de profundidade Y como negativo. Esta etapa é essencial, pois em seguida constrói-se a Triangulação de Delaunay desse novo conjunto, identificando os triângulos que ligam pontos com profundidades positivas e negativas. Assim, a partir da análise dos pontos que se encontram nos triângulos que ocorrem nas bordas, define-se que os vértices com profundidade positiva são os contornos e devem ser armazenados, diminuindo a redundância na nuvem. Este processo está demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Aplicação de uma borda regular maior que a nuvem de pontos; identificação de pontos de borda utilizando a grade regular e, em sequência, aplicação da Triangulação de Delaunay.

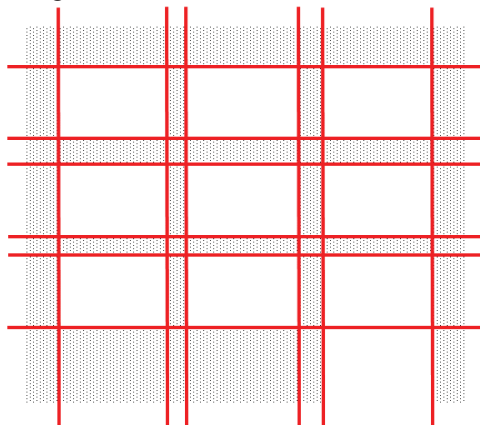


Fonte: O autor (2019).

É nesta etapa que é possível delinear a parede e os outros elementos presentes na fachada, como as portas e as janelas. Para isso, considera-se que as janelas são elementos retangulares e que se repetem seguindo um padrão geométrico, ou seja, estão alinhadas ao longo dos eixos X e Z. Ressalta-se que esta hipótese é satisfeita na maioria das construções, mas que não se trata de uma regra geral, ou seja,

algumas construções não poderão ser tratadas dessa forma. A partir das linhas vermelhas da Figura 18, percebe-se que portas e janelas seguem um mesmo alinhamento.

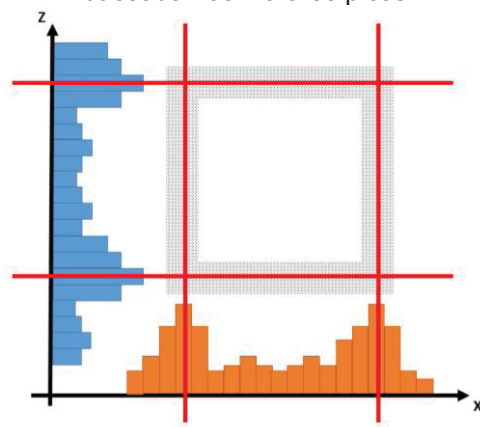
Figura 18 - Representação da geometria nos eixos X e Z de uma fachada com porta e janelas.



Fonte: O autor (2019).

Como os pontos que não eram considerados de bordas foram descartados, haverá maior concentração de pontos na região dos contornos, tanto internos quanto externos. Assim, pode-se definir os contornos dos elementos a partir da frequência de pontos, considerando que o trecho que com maior frequência se trata de um contorno. Para isto, gera-se um histograma de frequência tanto para o eixo X quanto para o eixo Z, onde os picos representarão as regiões de bordas, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Geração de histogramas de frequência no eixo X e no eixo Z para detecção dos contornos baseada nos maiores picos.

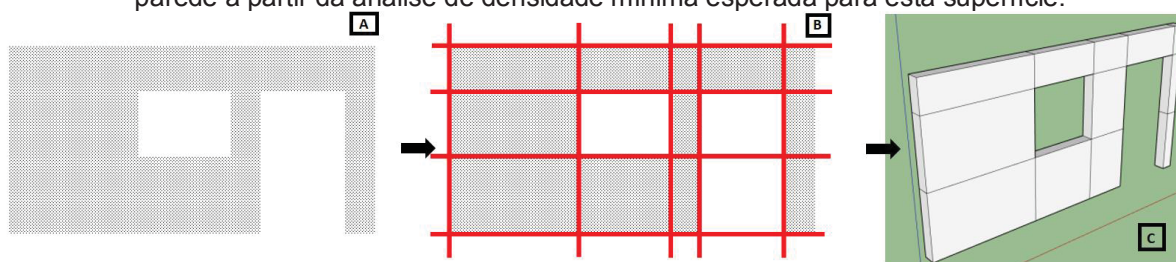


Fonte: O autor (2019).

Com a definição das linhas de bordas, define-se uma grade irregular sobre a

nuvem de pontos original. Desta maneira, as partes da grade que possuírem um número de pontos similar ou acima da quantidade mínima de pontos esperada para uma edificação são armazenadas e aquelas que tiverem baixa densidade são descartadas. Tal limiar, se trata do mesmo *threshold* utilizado no Tópico B deste capítulo, ou seja, a resolução esperada para o levantamento. Sendo assim, a fachada será composta pela união de todas as partes de grade que foram armazenadas.

Figura 20 - Aplicação de uma grade irregular sobre a nuvem de pontos e definição dos blocos de parede a partir da análise de densidade mínima esperada para esta superfície.



Fonte: O autor (2019).

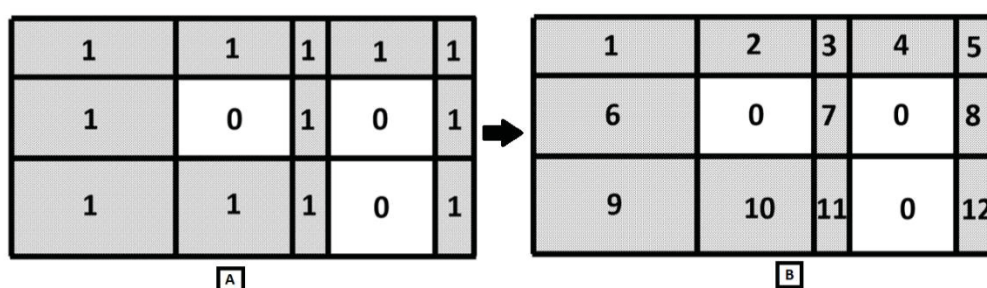
A missão agora é unir as partes da grade que foram armazenadas anteriormente para transformar os blocos em únicos e maiores. Levando em consideração que a fachada da edificação é composta pela união de várias partes de uma grade irregular, ela pode ser unificada identificando as arestas e vértices em comum entre dois polígonos e uni-los. Para isto, traz-se o conceito de Componentes Conexas, baseado na Teoria dos grafos.

Um grafo não-dirigido (grafo n-d) é considerado *conexo* se cada um de seus vértices está ao alcance de cada um dos demais. Em outras palavras, um grafo n-d é conexo se tem a seguinte propriedade: para cada par $s-t$ de seus vértices, existe um caminho com origem s e término t . Ao contrário disso, um grafo n-d é *desconexo* se não for conexo (IME-USP, 2019).

Quanto as componentes conexas de grafos n-d, tem-se que em um grafo nd, a relação “ao alcance de” entre vértices é uma relação de equivalência, ou seja, uma relação reflexiva, simétrica e transitiva, onde um caminho não deve ter arcos repetidos. Nesse sentido, esta relação impõe uma partição do conjunto de vértices em classes de equivalência, no qual dois vértices s e t estão na mesma classe se e somente se t está ao alcance de s . Logo, uma Componente Conexas de um grafo nd G é o subgrafo de G induzido por alguma das classes de equivalência da relação “ao alcance de” (IME-USP, 2019).

Tomando como referência a Figura 20 e aplicando esta teoria aos blocos gerados pela grade irregular, tem-se primeiramente uma matriz binária, onde 1 representa as áreas que possuem paredes e 0 os vazios. Em seguida, enumera-se as regiões em ordem crescente da esquerda para direita, iniciando no canto superior esquerdo e dando sequência em todas as linhas. Este processo é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Numeracao dos blocos existentes em ordem crescente da esquerda para direita.



Fonte: O autor (2019).

Logo após, faz-se a comparação do valor de cada região com os seus vizinhos. Caso o número da região analisada seja menor que os números de seus vizinhos, ele se mantém. Porém, caso a região analisada possua um número maior que seu vizinho, o menor valor a ela é aplicado. Isto é feito sucessivamente para cada linha desta matriz, formando regiões retangulares com uma mesma numeração. Além disso, pode-se ainda agrupar duas regiões caso elas compartilhem do mesmo ponto de começo e fim, por exemplo, os retângulos 8 e 12 da Figura 22.

Figura 22 - Uniao de blocos a partir da teoria dos Componentes Conexos.

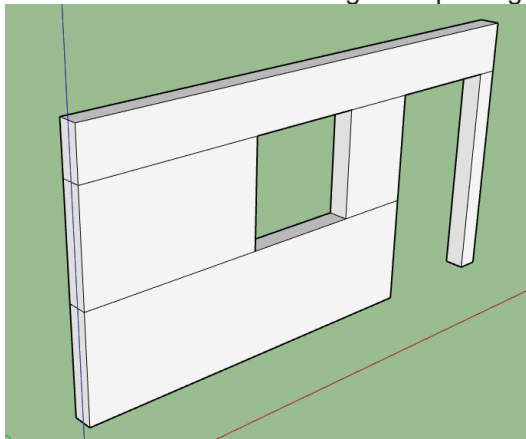


Fonte: O autor (2019).

A partir da relação de conectividade e por meio do agrupamento de elementos contíguos, gera-se uma malha menos fracionada e mais uniforme, contribuindo para geração de um modelo tridimensional com blocos únicos. No exemplo anterior, foram

geradas cinco regiões, dando origem à cinco blocos tridimensionais, como o exemplo abaixo. Para compor o modelo 3D, as grades foram exportadas em formato “.obj”, considerando uma profundidade padrão para a espessura da fachada de 15 cm baseado na NBR 7200-1982.

Figura 23- Modelo tridimensional de uma fachada gerado pelo agrupamento de blocos.

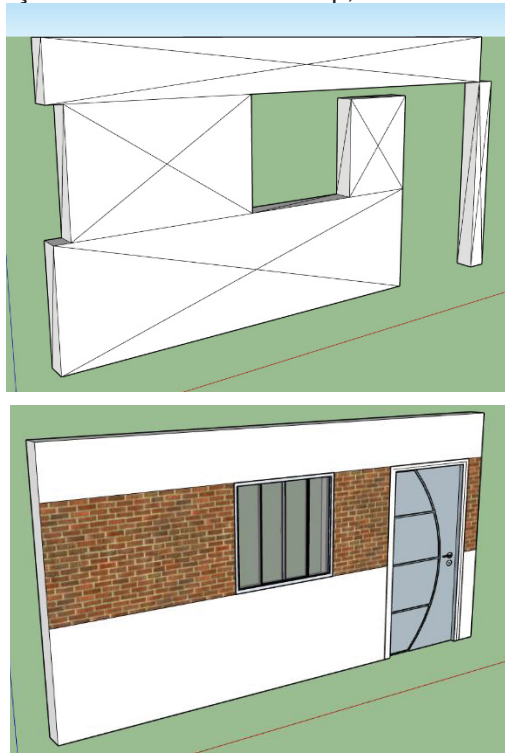


Fonte: O autor (2019).

Feito isto, é necessário converter o arquivo “.obj” para o formato “.dxf” utilizando o software “*CloudCompare*” para dar sequência à modelagem no software *Sketchup*. Porém ao importar todas as faixas para o *CloudCompare*, percebeu-se que as mesmas vieram representadas todas no mesmo plano, ou seja, pertenciam à mesma profundidade (plano zero). Para resolver este problema, as informações do processo de translação (vide tópico A) foram recuperadas para proceder com o processo inverso de forma manual no *Sketchup*.

Por fim, os blocos podem ser refinados manualmente, conservando as características principais dos objetos, porém deixando-os mais próximos da realidade. Além disso, o modelo também pode ser colorido e texturizado, além de receber objetos similares à edificação real.

Figura 24 - Finalização do modelo no Sketchup, inserindo cor, textura e objetos.

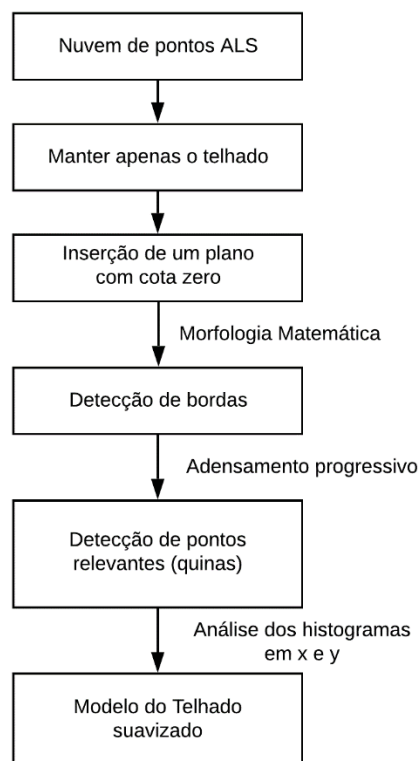


Fonte: O autor (2019).

3.2.3. Modelagem do telhado

A metodologia de modelagem do telhado foi dividida em quatro etapas que estão detalhadas a seguir, sendo elas: o pré-processamento, a detecção de bordas, a identificação de pontos relevantes por adensamento progressivo e a suavização do modelo pela análise dos histogramas. A sequência das etapas pode ser vista no organograma mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Organograma da metodologia aplicada para a modelagem de telhado.



Fonte: O autor (2019).

a. PRE-PROCESSAMENTO

Uma nuvem de pontos obtida por um levantamento LiDAR aéreo é composta por milhões de pontos da área levantada pela aeronave. Dessa maneira, a primeira etapa a ser realizada é a filtragem da nuvem de pontos para selecionar apenas a edificação de interesse. Neste estudo, foi feito um pré-processamento no software *CloudCompare*, isolando manualmente os pontos referentes aos telhados de estudo. Nesse caso, foram selecionados os telhados correspondentes às fachadas que foram modeladas.

Como o levantamento aéreo é calculado em coordenadas geodésicas, o telhado nem sempre se encontra orientado paralelo aos eixos X, Y, Z. Por isso, é necessário rotacionar a nuvem de pontos em torno de Z, para alinhar o telhado com a fachada principal de forma que o mesmo fique paralelo ao eixo X da fachada. Nesta etapa saímos de um referencial UTM e passamos para um referencial local. Este

processo é similar ao que foi realizado na etapa de modelagem de fachadas, vide “Orientação da nuvem de pontos laser terrestre” no tópico 3.2.2.A.

Para reduzir a redundância dos pontos, a densidade de pontos da nuvem de pontos é reduzida projetando a nuvem de pontos em uma grade regular horizontal com espaçamento próximo ao espaçamento de projeto. Deste processo resultam duas grades: a primeira verifica a ocorrência de pelo menos um ponto na célula (1) ou nenhum ponto na célula (0). Esta grade será chamada de grade “A”. A segunda armazena o valor da cota desta célula e será denominada de grade “ME”. Caso mais de um ponto ocorrer em uma célula, o menor valor de cota é adotado na grade “ME”. Esta etapa também faz com que os pontos duplicados sejam eliminados. Em relação aos parâmetros utilizados nesta fase, aconselha-se a adotar o menor valor da grade (last pulse) e 0.05m de resolução, podendo esta ser variável de acordo com a realidade do projeto. Por fim, lê-se as células com valores positivos, salvando-as.

b. DETECÇÃO DAS BORDAS DOS TELHADOS

Com a finalidade de aproximar as bordas da edificação, a grade binária “A” é utilizada. Por meio de técnicas de morfologia matemática, a grade “A” é primeiramente dilatada e, em seguida, erodida. Esta combinação de operadores de dilatação seguida de erosão é conhecida como fechamento ou (closing) e tem a vantagem de preencher vazios dentro da área do telhado. Este processo também foi usado na modelagem de fachadas.

A seguir, a grade “A” é erodida e o resultado da dilatação é armazenado como uma nova grade “B”. A diferença entre estas duas grades é o conjunto de células nas bordas da figura, ou seja, do telhado.

$$C = A - B \quad (7)$$

Com

A= grade original

B= erosão de A com elemento estruturante quadrado 3x3.

Este processo permite separar a nuvem de pontos em dois conjuntos novos: pontos nas bordas do telhado e pontos internos. É possível então, para cada conjunto,

ler a posição (X,Y) do centro de cada uma das células e a cota proveniente da grade “ME”.

c. MODELAGEM DO TELHADO POR ADENSAMENTO PROGRESSIVO

Da etapa anterior, dois conjuntos de pontos foram obtidos. O primeiro, os pontos nos contornos do telhado que delimitam o telhado e descrevem, parcialmente, sua variação em termos de altura. Ele seria suficiente para modelar telhados com formas simples como, por exemplo, aqueles com apenas um plano ou dois planos. O segundo conjunto inclui os pontos internos, muitos dos quais são coplanares e redundantes. A ideia central do método proposto é aplicar o conceito de adensamento progressivo proposto por Axelson (1999) para a extração de MDT em regiões cobertas por vegetação, mas com uma adaptação para a extração das formas do telhado. O princípio é, partindo de uma primeira aproximação do telhado, incluir novos pontos no modelo para tornar a forma do modelo mais próxima da forma real.

A primeira estimativa do telhado é obtida calculando uma grade TIN com os pontos localizados nas bordas do telhado. Se o telhado fosse plano, esta solução seria ótima, porém esta situação não acontece na maioria dos casos, havendo pontos que se afastam desta nuvem. Este modelo também apresenta redundância, pois inclui pontos colineares ao longo de cada borda reta, porém serve como primeira aproximação.

Na seguinte etapa, e dentro de um processo iterativo, avaliar se a inclusão de novos pontos, pontos oriundos do conjunto de pontos internos do telhado, pode contribuir para melhorar o modelo que está sendo gerado. Para isto, é necessário ter um parâmetro que descreva a adequação do modelo.

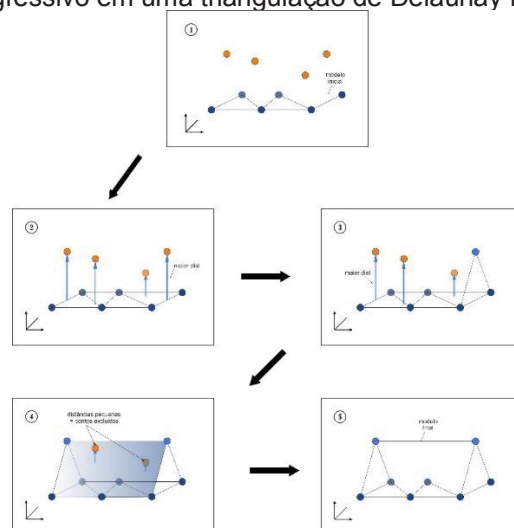
O processo pode ser descrito da seguinte forma:

- a) Inicia-se com um modelo simples do telhado, usando os pontos de bordas.
- b) Com estes pontos se constrói uma grade TIN.
- c) É avaliado se esta grade se aproxima da superfície descrita pelos pontos internos. Para isto, a distância entre cada ponto e o modelo TIN é calculada. Se todos os pontos se encontram próximos da grade TIN é considerado que o modelo é suficiente e o processo terminado. Porém, se existem pontos muito afastados (o que é medido com um limiar de tolerância de distância), o modelo é rejeitado.

- d) Caso o modelo seja rejeitado, o ponto interno mais afastado do modelo é incluído na expectativa de se obter um modelo mais adequado. Com este novo modelo se repete os passos b e c até que não seja necessário incluir novos pontos.

A Figura 26 mostra a ideia do algoritmo implementado, onde pontos distantes são incluídos no modelo baseados no cálculo da distância de ponto à plano. A partir de uma primeira triangulação de Delaunay calcula-se a distância entre os pontos pertencentes a triangulação inicial (pontos em azul) e os demais pontos da nuvem (pontos em laranja) (Figura 26.1). Em sequência, identifica-se o ponto com maior distância (Figura 26.2) e o classifica como ponto relevante. Desta forma o ponto ‘e’ é incluído na malha triangulada (Figura 26.3). Este processo é repetido até que nenhum ponto se encontre distante do modelo, onde os pontos que possuem uma distância menor que um limiar inicialmente definido são excluídos do modelo (Figura 26.4). Assim se obtém uma aproximação boa, mas com menos pontos (Figura 26.5).

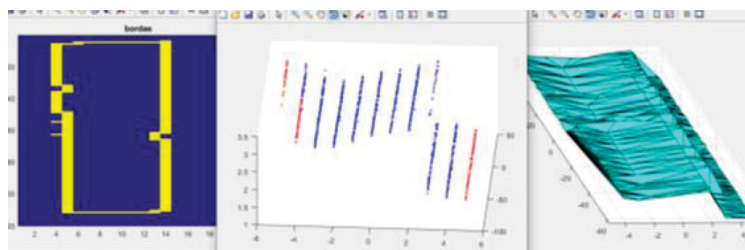
Figura 26 - Aproximação de um modelo a partir da aplicação do algoritmo de adensamento progressivo em uma triangulação de Delaunay inicial.



Fonte: O autor (2019).

Feito isto, tem-se os seguintes resultados: a Figura 27a com o resultado da subtração de “A” por “B”, a Figura 27b com as bordas (vermelho) na nuvem resultante e, finalmente, a Figura 27c o modelo 3D após as iterações.

Figura 27 - Resultado da aproximação inicial do modelo.

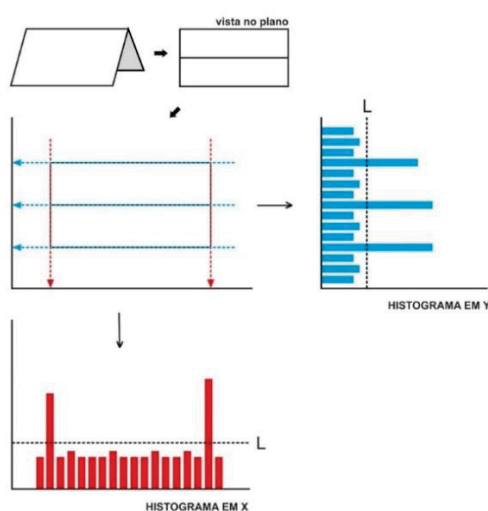


Fonte: O autor (2019).

d. Suavização do modelo

Apesar de já se ter um modelo do telhado, pode-se simplificar ainda mais a solução anterior. Isso pode ser feito criando novamente uma grade regular com pontos anteriores e gerando histogramas parciais para as linhas e colunas. Na Figura 28, vê-se os histogramas parciais de X e Y em vermelho e azul, respectivamente, que foram gerados a partir do acumulo dos pontos em um certo alinhamento: em X (seta tracejada azul) ou em Y (seta tracejada vermelha). Levando em consideração que as bordas são compostas por diversos pontos alinhados, as bordas serão representadas por picos no histograma, podendo então ser identificadas e separadas. A partir da definição dos máximos locais nos histogramas, baseado na definição de um limiar L (linha tracejada preta), pode-se eliminar os pontos que não correspondem aos picos dos histogramas, restando apenas os pontos referentes às bordas dos telhados.

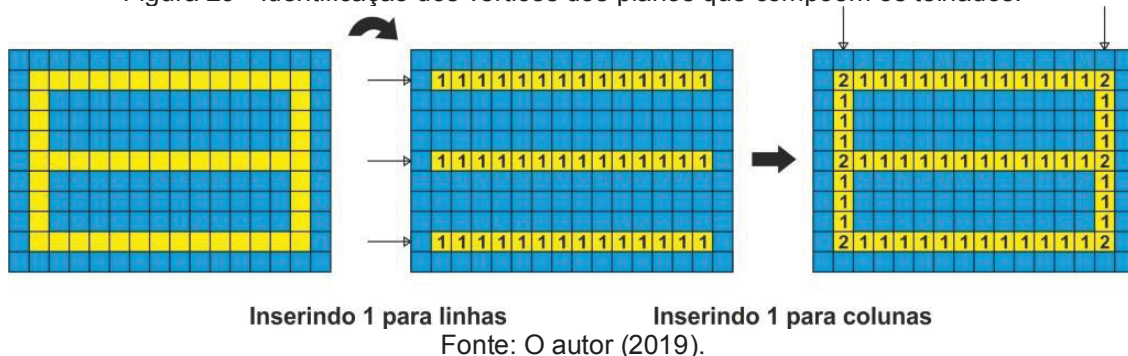
Figura 28 - Extração dos contornos dos telhados pela análise dos histogramas em X e Y.



Fonte: O autor (2019).

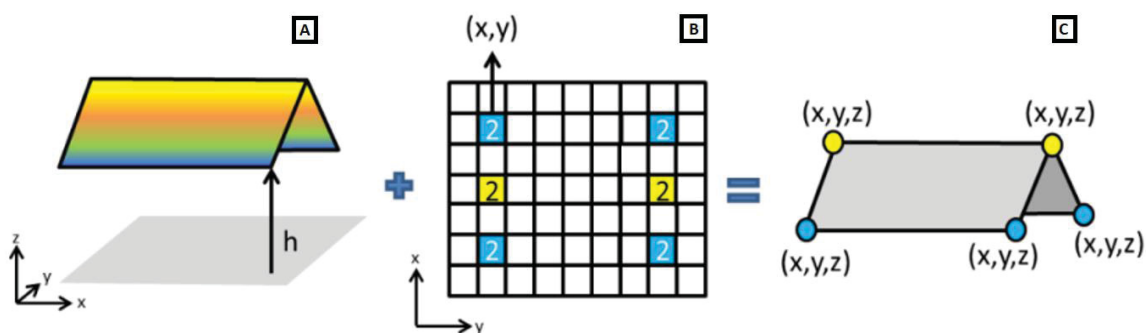
Com os segmentos de bordas definidos na grade (em amarelo), soma-se agora o valor 1 para cada elemento da matriz, tanto em linha quanto em coluna. Desta maneira, quando se há o cruzamento de linha com coluna, tem-se a soma do valor da linha com o valor da coluna, resultando em um elemento com valor 2.

Figura 29 - Identificação dos vértices dos planos que compõem os telhados.



A partir disso, os pontos classificados com valor 2 podem ser considerados pontos relevantes e devem ser mantidos na nuvem, já os demais podem ser eliminados. Para os pontos destacados como relevantes, recupera-se a posição X e Y da grade regular e o Z do MDT anteriormente gerado, tendo subsídios para a criação de um modelo 3D de forma suavizada, como mostra a Figura 30.

Figura 30 - DTM, pontos com valor 0, 1 e 2; e solução final.



Fonte: O autor (2019).

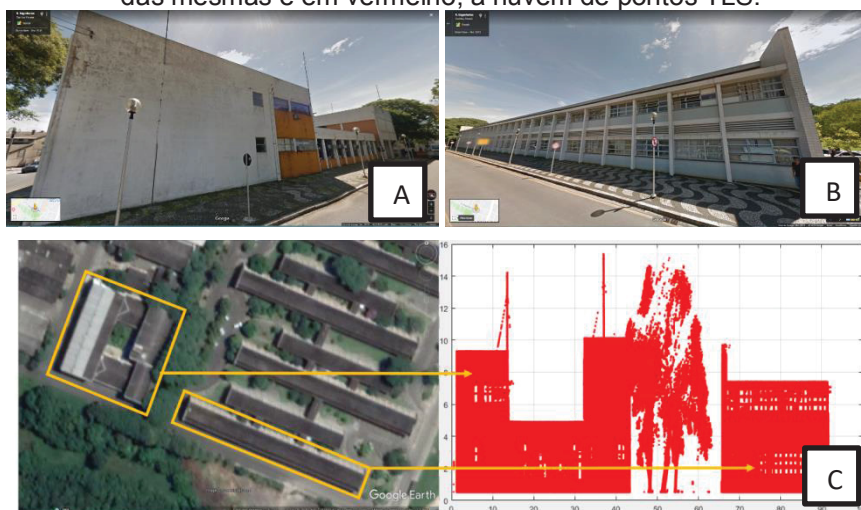
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em cada uma das etapas da metodologia anteriormente apresentadas. A metodologia foi aplicada em diversas fachadas localizadas dentro do Centro Politécnico da UFPR. Buscou-se trabalhar com fachadas de diferentes estilos para avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta, tornando os experimentos mais complexos.

4.1. Experimento 1

A primeira cena conta com duas fachadas de aproximadamente 55m (Figura 31a) e 110m (Figura 31b) de comprimento, respectivamente. Na Figura 31c tem-se o recorte de uma cena da nuvem de pontos obtido pelo levantamento TLS, contendo as edificações estudadas.

Figura 31 - Edificações que compõem o experimento 1. Destacados em amarelo, tem-se a vista área das mesmas e em vermelho, a nuvem de pontos TLS.

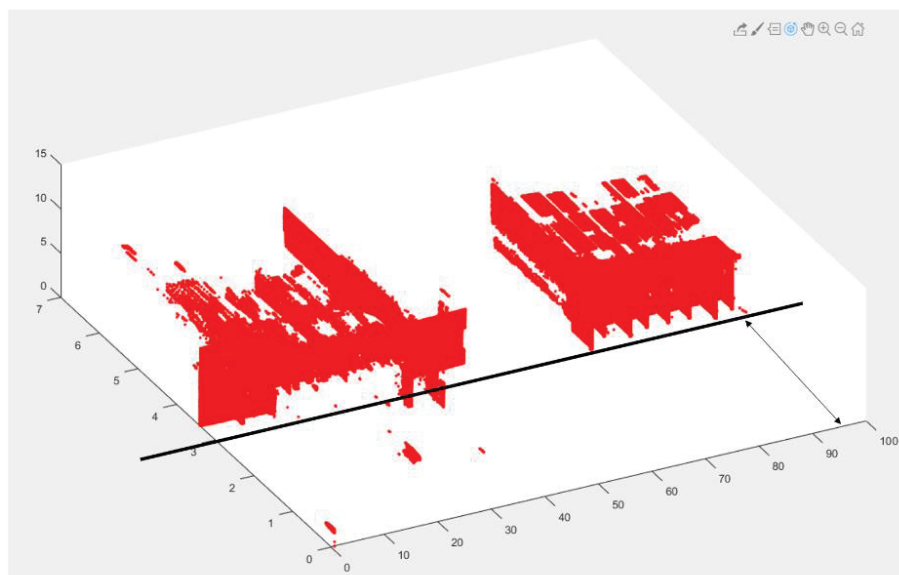


Fonte: O autor (2019).

Dando início à metodologia foi realizada a orientação da nuvem de pontos para tornar o eixo principal da fachada paralelo ao eixo X e, assim, poder dar sequência à segmentação da nuvem. Embora, aparentemente, esta nuvem caracterize uma superfície bidimensional, ou seja, um plano vertical, na realidade essa fachada está composta por vários tipos de elementos: paredes planas, pilares, janelas (espaços vazios) e telhados. Na Figura 32 é mostrado o conjunto de pontos deste experimento

já orientado, utilizando escalas diferentes para os três eixos coordenados, com a finalidade de enfatizar os elementos anteriormente citados.

Figura 32 - Nuvem de pontos TLS orientada aos eixos com o plano de fachada principal paralelo o eixo X.

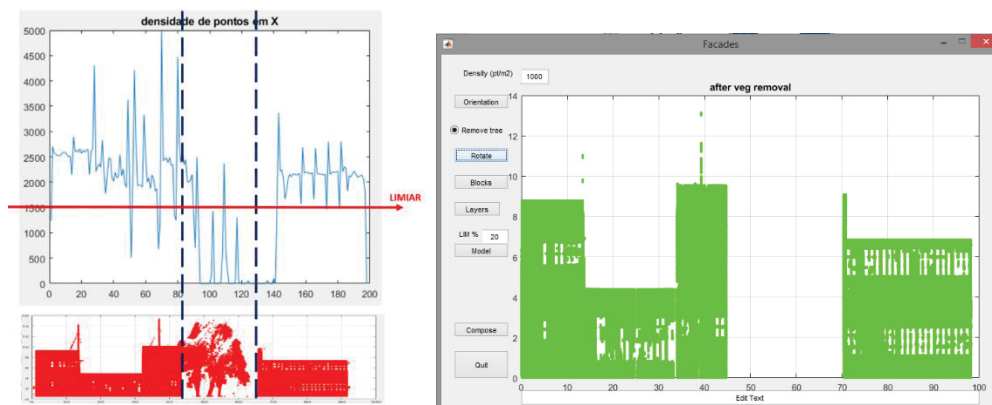


Fonte: O autor (2019).

Em seguida, o histograma de densidade sobre a nuvem de pontos foi gerado para dar subsídio na etapa de remoção da vegetação, facilitando a posterior separação das edificações. Percebeu-se que a frequência na região de vegetação foi menor que na região da edificação, tendo em vista que a vegetação não possui uma superfície contínua, ou seja, parte dos pontos laser acaba se dissipando. A partir dessa análise, removeu-se os pontos pertencentes as grades que possuíam uma densidade de pontos abaixo do esperado para o levantamento.

A Figura 33 se trata do resultado desta etapa para o Experimento 1. Pode-se perceber que quando se compara o histograma de frequência ao longo do eixo X e a nuvem de pontos da cena, os picos presentes na área em que se encontra a vegetação são menores. Isso pode ser visto na área localizada entre as linhas tracejadas em azul. Visto isto, definiu-se um limiar que diferenciasses a densidade de pontos em áreas de edificação e de vegetação, mostrado na seta em vermelho. Sendo assim, os pontos abaixo da resolução esperada para a uma edificação (limiar) foram descartados, resultando em uma nuvem de pontos filtrada, como pode ser visto na nuvem de pontos em verde a direita. Desta forma, grande parte da vegetação foi eliminada.

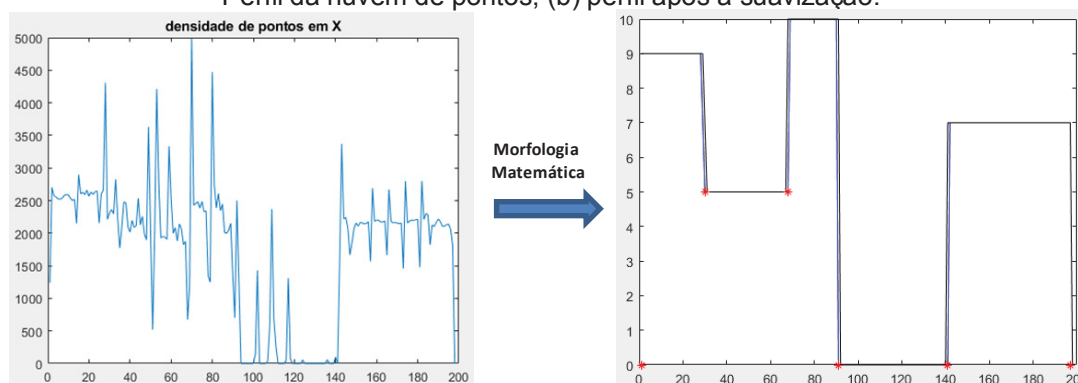
Figura 33 - Remoção da edificação utilizando histograma de frequência.



Fonte: O autor (2019).

Logo após, tendo a nuvem de pontos apenas das edificações, foram identificados os blocos de fachada. Inicialmente foi traçado o perfil dos elementos presentes da cena para identificar as formas presentes nas edificações e, em seguida, para eliminar pontos espúrios foram aplicadas as ferramentas de erosão e dilatação, resultando em um perfil suavizado da nuvem de pontos. Na Figura 34, tem-se o histograma da densidade em X da nuvem de pontos do Experimento 1 (a) e o perfil gerado após a aplicação dos filtros de morfologia matemática (b). Percebe-se que as feições relevantes da edificação foram mantidas e delimitadas de forma suave.

Figura 34 - Exemplo de suavização do perfil de uma nuvem de pontos contendo dois prédios: (a) Perfil da nuvem de pontos, (b) perfil após a suavização.

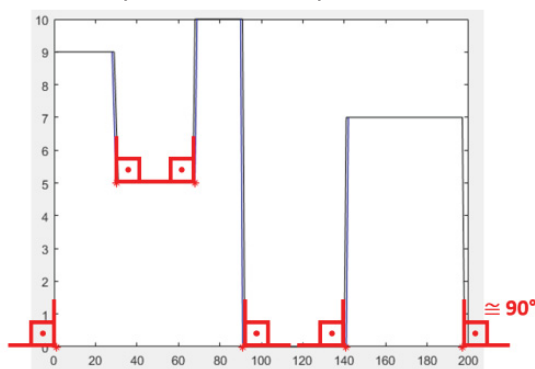


Fonte: O autor (2019).

Levando em consideração que a edificação possui partes com diferentes alturas, foram determinados os pontos que marcassem as quinas das edificações. Tais locais são representados por regiões onde há uma variação angular de aproximadamente 90° entre o ponto (quina) anterior e o posterior. Na edificação estudada, utilizando uma resolução com espaçamento de 0.05m, obteve-se os

seguintes pontos de borda que serão utilizados como referência para separação dos blocos de fachada.

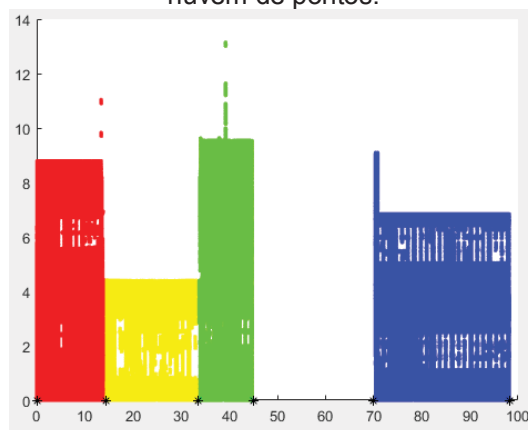
Figura 35 – Identificação dos pontos em que há variação angular de aproximadamente 90 graus entre o ponto anterior e posterior.



Fonte: O autor (2019).

A partir dos pontos acima, a nuvem foi particionada e dividida em diferentes blocos de fachada de acordo com os níveis de altura. Neste exemplo, a edificação foi dividida em quatro blocos de fachada, conforme Figura 36, e processados separadamente nas etapas posteriores.

Figura 36 – Blocos de fachada identificados por cores obtidos pela análise do perfil suavizado da nuvem de pontos.



Fonte: O autor (2019).

Percebe-se que a metodologia utilizada conseguiu detectar com sucesso os blocos de fachada de acordo com as diferentes alturas. Aparentemente restaram pontos que não seguiam o padrão da forma retangular dos blocos, como por exemplo, as linhas verticais nos blocos vermelho, verde e azul. Porém após uma análise de campo, percebeu-se que as linhas formadas acima da fachada nos blocos vermelho

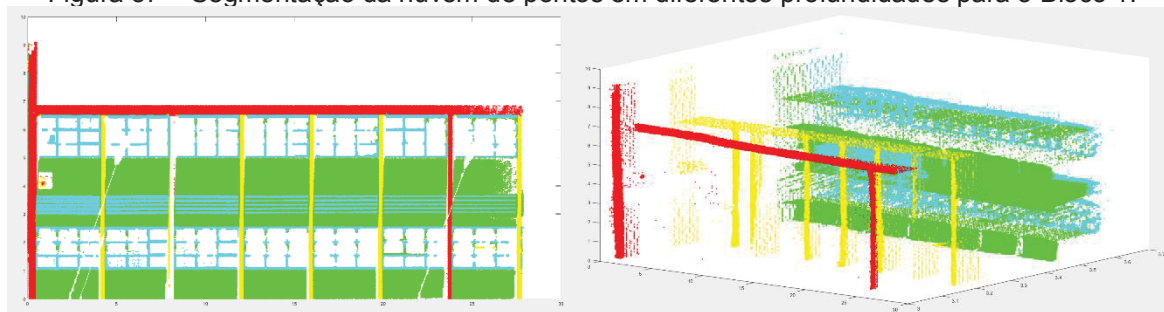
e azul representavam os pilares laterais, e a linha formada no bloco verde se tratava de uma antena.

Para cada bloco foi realizada a análise dos planos que compõem a fachada em diferentes níveis de profundidade para tornar o modelo mais realista e detalhado. Para isso, gerou-se o histograma de frequência de pontos no eixo Y utilizando um passo de 0,10m a fim de identificar em quais regiões haveria maior concentração de pontos, ou seja, os planos de fachadas. A escolha do passo foi condicionada ao nível de detalhamento de obras arquitetônicas, já que trabalhar com um espaçamento maior acarretaria em uma representação mais genérica da edificação, desprezando elementos importantes.

A seguir serão mostrados os resultados obtidos para cada bloco. Vê-se que o algoritmo foi capaz de detectar diferentes números de planos de acordo com a especificidade da superfície de cada bloco de fachada.

No Bloco 1 foram gerados 4 níveis de profundidade, sendo eles o vermelho para as colunas principais, o amarelo para as colunas secundárias, o verde para a parede principal e o azul representam as bordas das janelas e os ruídos coletados devido à composição de vidro das mesmas. Ressalta-se que tais cores foram escolhidas de forma aleatória para representar cada nível de fachada e não representam a real coloração da edificação.

Figura 37 – Segmentação da nuvem de pontos em diferentes profundidades para o Bloco 1.

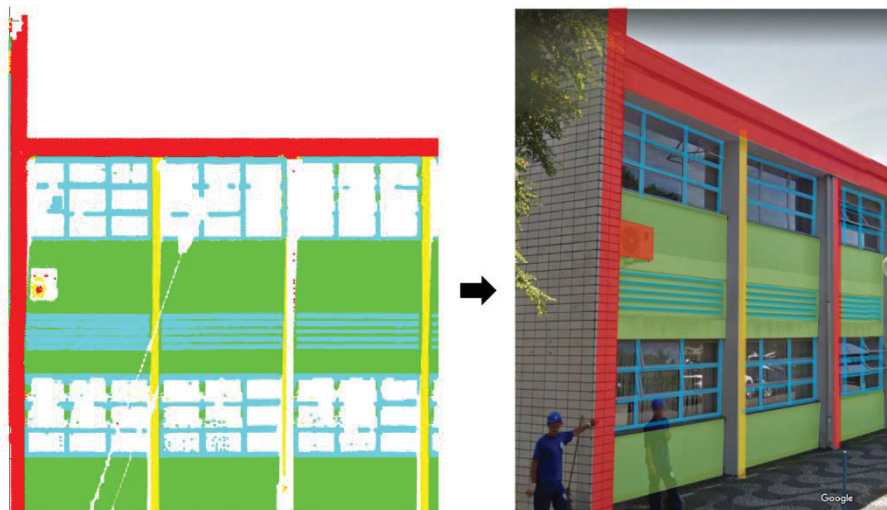


Fonte: O autor (2019).

Na Figura 38 tem-se um recorte do resultado anterior para uma análise mais detalhada da segmentação e comparação com uma imagem real da edificação. Vê-se que existem dois diferentes níveis de pilares: um referente aos pilares principais (vermelho) e outro aos secundários (amarelo), tal segmentação condiz com a

realidade verificada em campo, onde há uma pequena diferença de profundidade entre esses dois tipos de pilares.

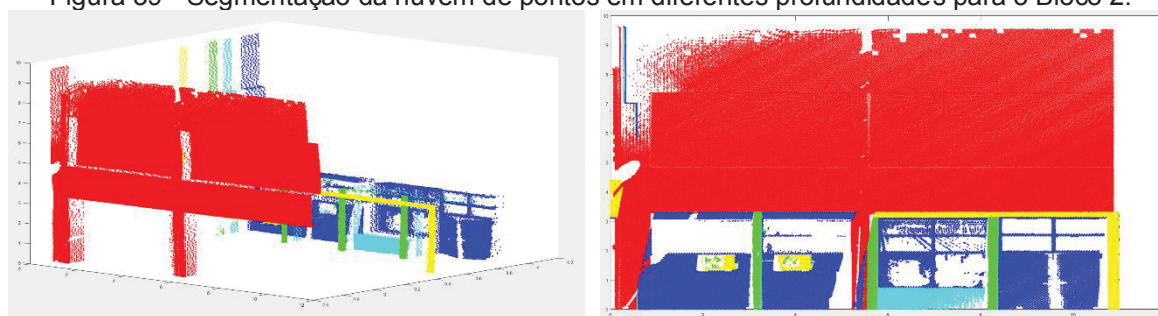
Figura 38 – Comparação da segmentação da nuvem de pontos com a imagem real da edificação.



Fonte: O autor (2019).

Para o Bloco 2 foram identificados 5 planos, sendo eles o plano vermelho para o primeiro plano da fachada, o verde para um segundo plano de pilares, o amarelo para vigas que se encontram mais ao fundo e os ares-condicionados e, por fim, o último plano em azul representando a parede.

Figura 39 - Segmentação da nuvem de pontos em diferentes profundidades para o Bloco 2.

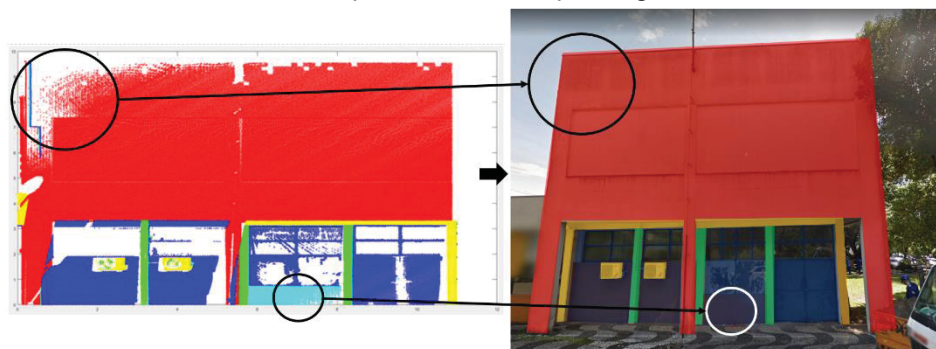


Fonte: O autor (2019).

Ainda sobre este bloco percebe-se que a lateral esquerda da edificação teve parte dos pontos removidos pelo código. Em uma primeira análise, estranhou-se que a última parede tenha se dividido em dois planos (azul claro e azul escuro), porém confirmou-se a veracidade da segmentação após uma visita de campo, no qual foi constatada a real diferença de profundidade entre os dois planos azuis. Outro detalhe

observado foi que a coluna direita da edificação presente no primeiro plano não apareceu no momento da segmentação.

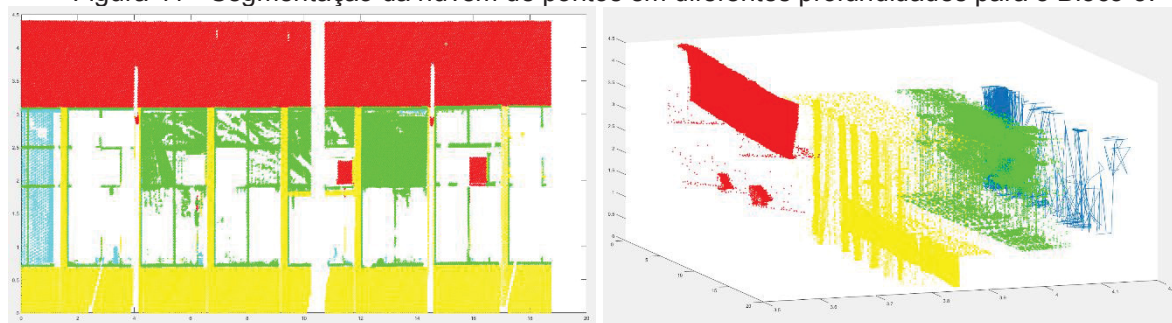
Figura 40 – Comparação da segmentação do Bloco 2 com a fachada real. Em destaque, parte da nuvem de pontos removida pelo algoritmo.



Fonte: O autor (2019).

Já para o Bloco 3 foram definidos 4 planos, no qual o vermelho representa a faixa superior presente na edificação, o amarelo a parede principal da fachada, o verde pontos coletados nas janelas e nas suas bordas e, por fim, o azul, pontos no interior da edificação. Ressalta-se que, por serem de vidro, as janelas deveriam ser mostradas como espaços vazios, porém em algumas regiões a resposta se assemelha a planos opacos devido à presença de cortinas ou objetos encostados nas janelas.

Figura 41 - Segmentação da nuvem de pontos em diferentes profundidades para o Bloco 3.

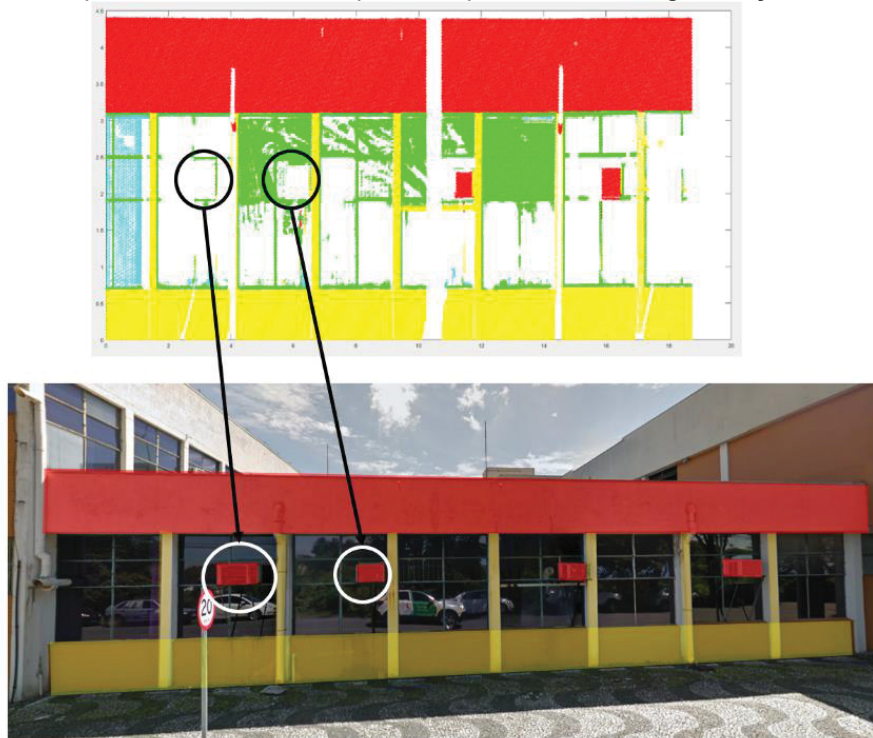


Fonte: O autor (2019).

Para este bloco vê-se que o resultado também apresentou inconsistências na identificação de certos detalhes. Por exemplo, nota-se a existência de dois ar-condicionados na fotografia real (Figura 42) enquanto, no modelo, os mesmos não foram identificados na nuvem de pontos. Além disso, vê-se na que algumas partes das janelas foram identificadas como planos opacos por causa da existência de

persianas e armários internos, contribuindo para que a superfície não fosse mais dada como translúcida, ou seja, houve retorno do feixe laser.

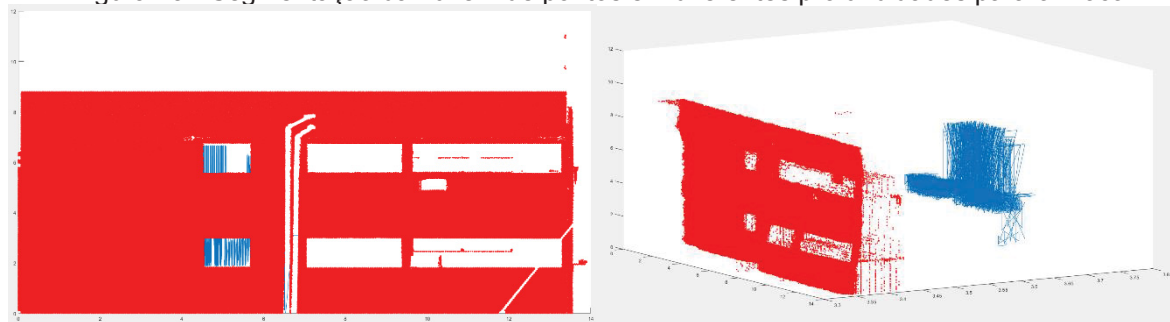
Figura 42 - Comparação da segmentação do Bloco 3 com a fachada real. Em destaque, objetos presentes na fachada que não apareceram na segmentação.



Fonte: O autor (2019).

Por fim, tem-se o último bloco de fachada composto por apenas dois 2 planos, um vermelho que se trata da parede principal e um azul que são pontos no interior da edificação, coletados devido à presença de janelas de vidro na fachada.

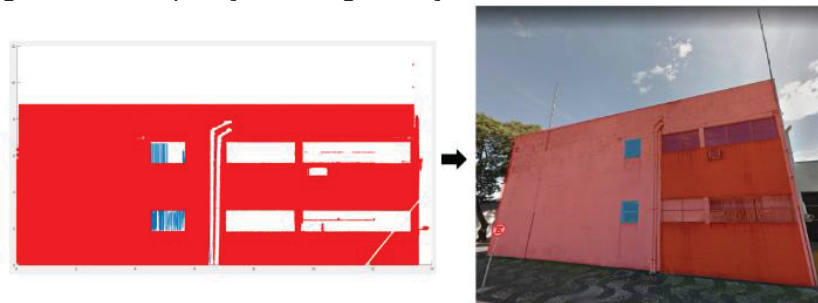
Figura 43 - Segmentação da nuvem de pontos em diferentes profundidades para o Bloco 4.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 44 tem-se a comparação da segmentação com uma foto da edificação, onde se percebe a nítida definição dos contornos das janelas.

Figura 44 - Comparação da segmentação do Bloco 4 com a fachada real.



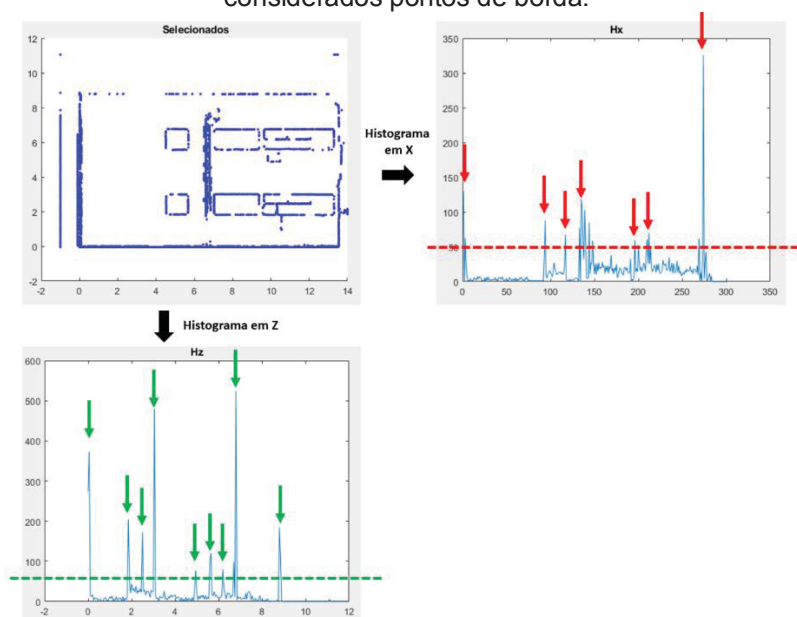
Fonte: O autor (2019).

A partir dos planos de fachada, realizou-se a detecção de bordas para definição dos contornos da edificação e dos elementos a ela pertencentes, como portas e janelas. Nesta parte foi realizada a inserção de uma grade regular e executada a Triangulação de Delaunay para identificação dos vazios.

Partindo do pressuposto que, nesta etapa, as regiões de bordas de fachadas são marcadas por concentração de pontos nos eixos X e Z foi necessário gerar os histogramas da edificação baseados na densidade de pontos nestas direções. Neste sentido, os picos médios das curvas dos histogramas representam possíveis bordas da edificação e, assim, podem ser traçados.

Para melhor definição das bordas foi definido um limite para que o código analisasse apenas parte dos picos e assim trabalhasse de forma mais efetiva, delimitando apenas os contornos realmente relevantes. Na Figura 45 tem-se, para a primeiro nível de profundidade do Bloco 1, a seleção dos picos que darão origem aos traçados de contorno, respeitando o limiar definido pelo usuário, representado pela linha tracejada em vermelho. Neste exemplo, foram então gerados histogramas parciais em X e em Z, que serviram de subsidio para definir as regiões de contorno da fachada a partir dos picos existentes. Partindo do pressuposto que o histograma realiza a soma dos pontos da nuvem de pontos em um certo alinhamento e que os contornos são regiões com um acumulo expressivo de pontos, pôde-se identificar os contornos relevantes a partir da identificação dos picos ao longo da fachada principal, em X (setas em vermelho) e na altura, em Z (setas em verde).

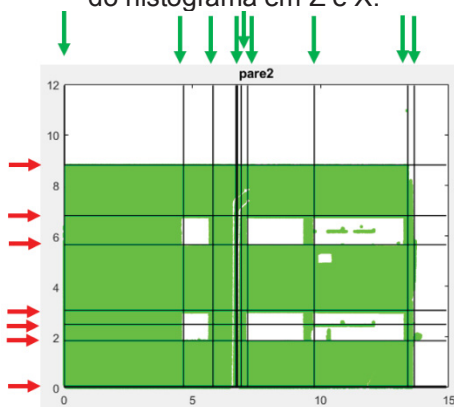
Figura 45 - Os pontos identificados com uma seta representam picos do histograma e foram considerados pontos de borda.



Fonte: O autor (2019).

Vê-se que o fato da edificação possuir um padrão geométrico e regular entre portas e janelas facilitou a definição dos contornos, já que os mesmos foram definidos com primitivas básicas, ou seja, foram gerados vetores em forma de segmentos de retas, conforme mostrado na Figura 46. As linhas em preto representam as linhas de contorno, as setas em vermelho e verde representam as bordas geradas a partir dos picos do histograma em Z e X, respectivamente. Ressalta-se que em fachadas que fogem à este padrão, a metodologia apresentada pode não resultar em um modelo satisfatório.




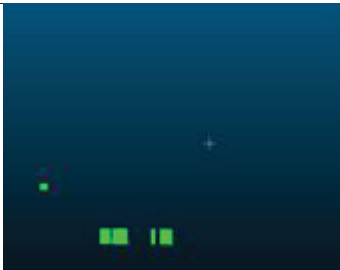


Figura 46 – Identificação das linhas de contorno para uma edificação baseado na análise dos picos do histograma em Z e X.





Fonte: O autor (2019).

Após diversos testes, verificou-se que não era viável inserir o mesmo limite para todas as faixas de profundidade do bloco devido às particularidades de cada situação. Neste sentido, em busca de um resultado mais consistente e detalhado, foram utilizados limites específicos para cada faixa. Abaixo tem-se o limite utilizado para cada faixa no Experimento 1 e os modelos gerados e visualizados no software CloudCompare.

QUADRO 3 - Blocos para cada faixa obtidos a partir de limiares diversos.

PARAMETROS UTILIZADOS – Experimento 1			
Bloco	Faixa	Limiar	Resultado do modelo
Bloco 1	Faixa 1	10%	
	Faixa 2	10%	
Bloco 2	Faixa 1	5%	
	Faixa 2	2%	
	Faixa 3	5%	
Bloco 3	Faixa 1	15%	

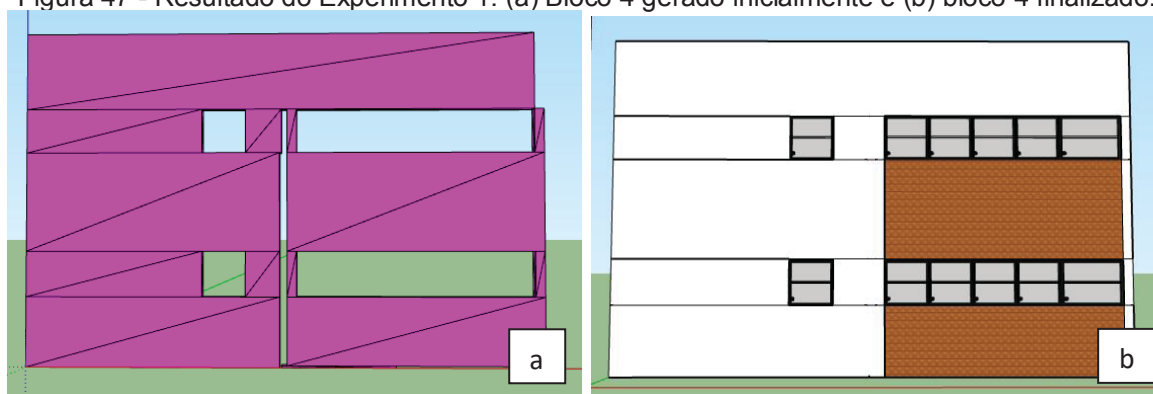
	Faixa 3	5%	
Bloco 4	Faixa Única	15%	

Fonte: O autor (2019).

Dessa maneira, as faixas foram exportadas no formato “.dxf” para finalização da modelagem no software *Sketchup* e inseridas cada uma em seu nível de profundidade, baseando no plano médio de cada faixa. Para compor o modelo tridimensional foram gerados blocos a partir da malha aplicada anteriormente, com o padrão de 0.15 m de espessura das paredes.

Com o modelo da fachada no software de modelagem, realizou-se um ajuste fino, melhorando a qualidade do produto final, inserindo detalhes, como cor, textura e objetos, conforme mostrado na Figura 47. Para deixar o modelo mais refinado e regular, utilizou-se de fotos do local e visitas em campo para verificar detalhes da edificação. Por exemplo, foi possível verificar que a linha de falha vertical no meio da fachada se trata de uma tubulação em frente à edificação, podendo então ser preenchida como elemento sólido.

Figura 47 - Resultado do Experimento 1: (a) Bloco 4 gerado inicialmente e (b) bloco 4 finalizado.



Fonte: O autor (2019).

Este mesmo procedimento foi feito para todos os outros blocos de fachada do Experimento 1 e demais experimentos. Na Figura 48, encontram-se os modelos gerados dos outros blocos de fachada pertencentes à primeira edificação do experimento: (a) Bloco 3; (b) Bloco 2; (c) Bloco 1.

Figura 48 – Demais resultados do Experimento 1: (a) Blocos gerados inicialmente e (b) blocos finalizados.



Fonte: O autor (2019).

Com todos os blocos finalizados, tem-se o modelo 3D da fachada do edifício. O método proposto tem o diferencial de detectar as diversas profundidades em uma fachada, se tratando de uma vantagem em relação à modelagem apenas por fotos. Além disso, em relação à modelagem por técnicas tradicionais (com trena ou estação total, por exemplo) o método garante um processo mais rápido e autônomo. Na Figura 49 tem-se o modelo geométrico finalizado em comparação com uma imagem real da edificação, onde se percebe que a partir da metodologia apresentada é possível chegar a um resultado satisfatório e compatível com a realidade.

Figura 49 – Comparação dos modelos finais já com os blocos agrupados com as fachadas reais.

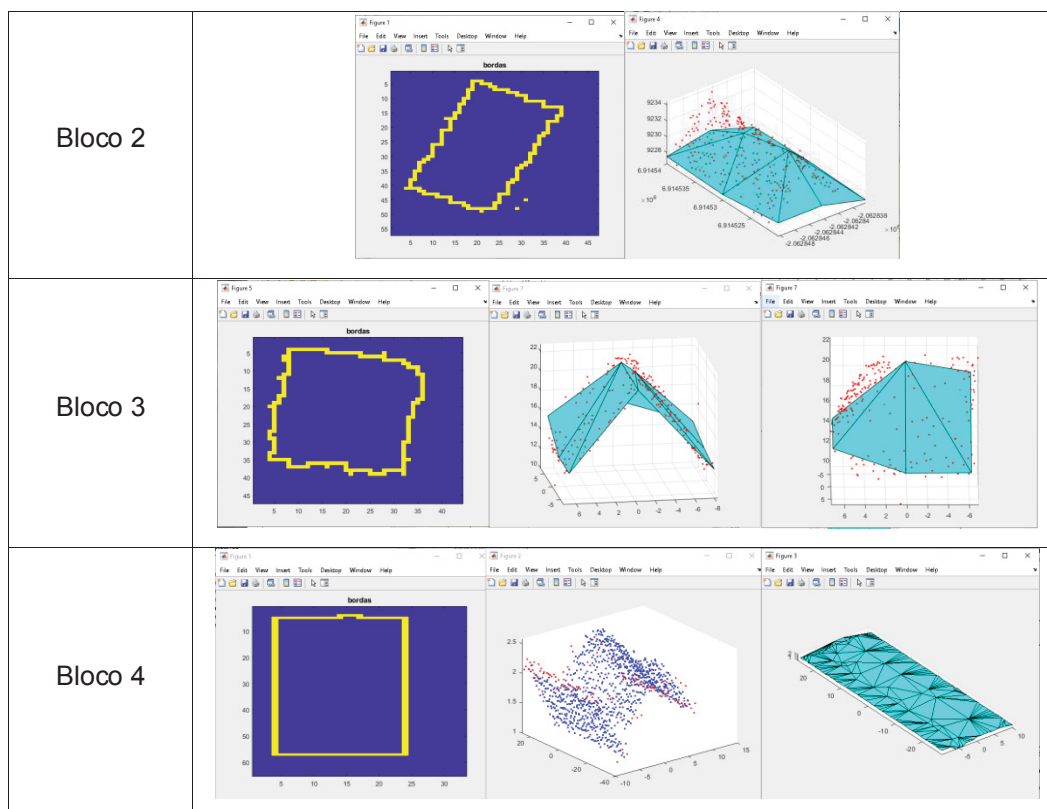


Fonte: O autor (2019).

Em relação à modelagem de telhados, obteve-se o primeiramente o resultado da subtração da nuvem original pela nuvem em que se foi aplicada morfologia matemática, conforme Quadro 4a. Este processo fez com que vazios fossem eliminados e o contorno suavizado. Com a definição desta borda, os pontos da nuvem foram classificados pertencentes à borda ou não, como mostra a Quadro 4b. Em sequência, após a execução do algoritmo de adensamento progressivo baseado em uma triangulação de Delaunay inicial, obteve-se o modelo 3D (Quadro 4c).

QUADRO 4 - Resultados dos modelos sem suavização.

Bloco	Borda dos telhados após suavização (A); bordas destacadas em vermelho na própria nuvem de pontos (B); modelo 3D gerado (C).
Bloco 1	

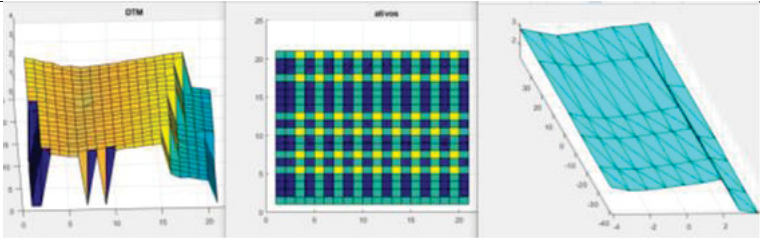
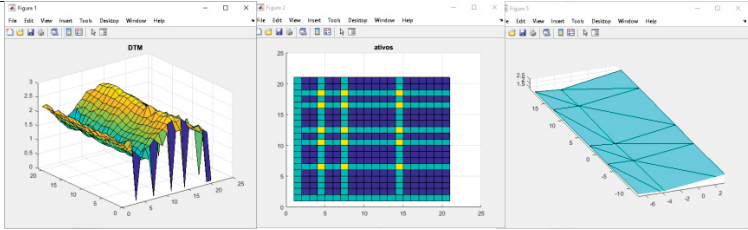


Fonte: O autor (2019).

Com o modelo já criado, foram executados procedimentos para torná-lo mais suave. Isso foi possível analisando novamente os histogramas parciais tanto para linhas quanto para colunas, e identificando os máximos locais. Após identificação dos pontos relevantes, recuperou-se sua posição planimétrica por meio da grade regular anteriormente criada e sua altura por meio do MDT gerado no início do processo.

Ressalta-se que este procedimento foi aplicado apenas em telhados com geometrias mais complexas, não sendo necessário aplica-lo em telhados mais regulares, como os blocos 2 e 4. Abaixo, tem-se a sequência de resultados gerados nessa parte do estudo, sendo o Quadro 5a o MDT gerado para o telhado; a Quadro 5b a grade regular com classificada em azul para valores zero, verde para valores iguais a um e amarelo para valores iguais a dois; e por fim, a Quadro 5c com o modelo 3D do telhado após suavização. Ao final de todo processo, o modelo pode ser exportado para o *Sketchup*, finalizando-o e unindo-o com o modelo da fachada.

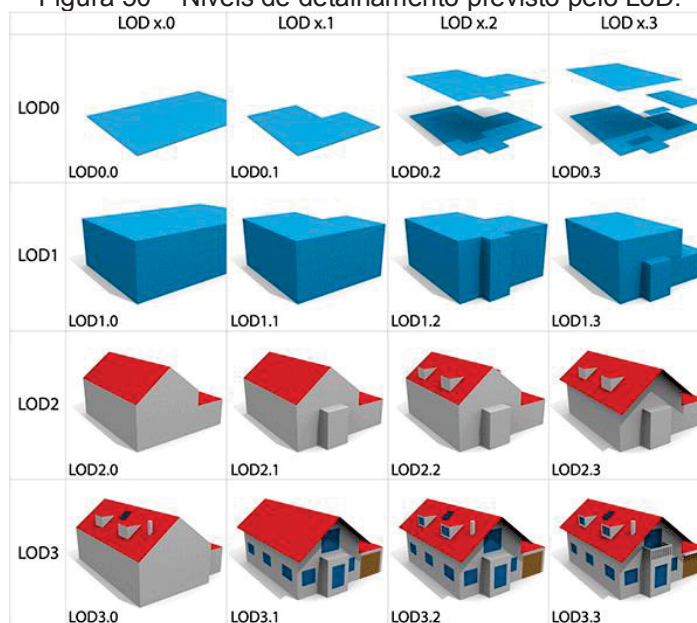
QUADRO 5 - Resultados dos modelos após suavização.

Bloco	DTM (A); grade com os pontos relevantes (B); e solução final (C).
Bloco 1	
Bloco 2	Não se aplica.
Bloco 3	Não se aplica.
Bloco 4	

Fonte: O autor (2019).

Baseado na definição de LoD, pode se considerar que o modelo obtido atinge um nível de detalhamento 3, numa escala LOD3.1, obtendo a representação da edificação com as formas da fachada e suas variações de altura e profundidade, além de possuir a localização das portas e janelas, e a modelagem do telhado, conforme mostrado na Figura 50.

Figura 50 – Níveis de detalhamento previsto pelo LoD.



Fonte: O autor (2019).

Pfeifer e Briese (2007) ressaltam que o modelo pode ser melhorado integrando os feixes laser com imagens, agregando o registro de cores. Isso pode contribuir para geração de um modelo mais detalhado, obtendo a interpretação de cores, texturas e materiais presentes na cena. Neste sentido, o modelo pode ser visualmente melhorado aplicando técnicas de renderização. Isso inclui a adição de cores e texturas, bem como inserção de elementos presentes na cena, como carros, árvores e pessoas, objetivando obter modelos fotorealistas, amplamente utilizados para finas arquitetônicas.

Para a realização desta etapa é importante que se tenha um banco de imagens da edificação, tendo em vista que apenas a partir da nuvem de pontos não é possível identificar cores e materiais. Caso seja necessário otimizar esta etapa, aconselha-se a criar um banco de dados genéricos para os elementos presentes na fachada, como portas e janelas padrões. Como exemplo, gerou-se as cenas mostradas na Figura 51 utilizando o versão trial do software Lumion.

Figura 51 – Modelos finais renderizados utilizando software Lumion.

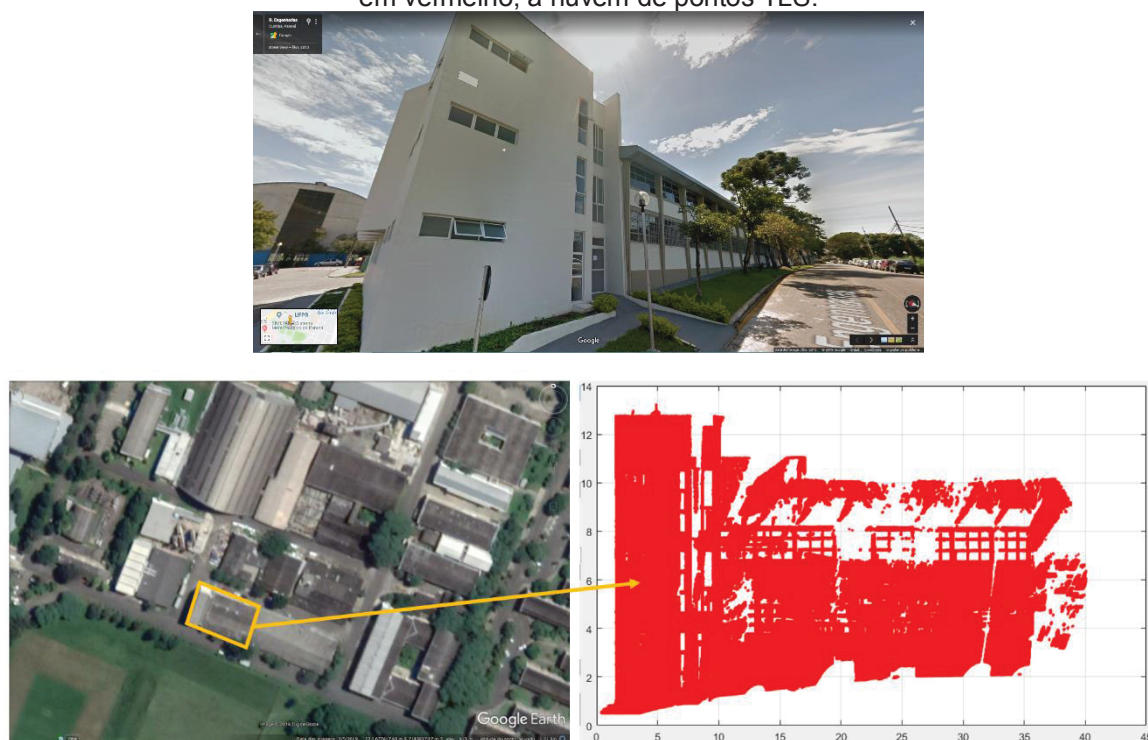


Fonte: O autor (2019).

4.2. Experimento 2

A segunda cena conta com uma fachada de aproximadamente 40m de comprimento. Na Figura 52 tem-se a fachada real e o recorte de uma cena da nuvem de pontos obtido pelo levantamento TLS, contendo a edificação estudada.

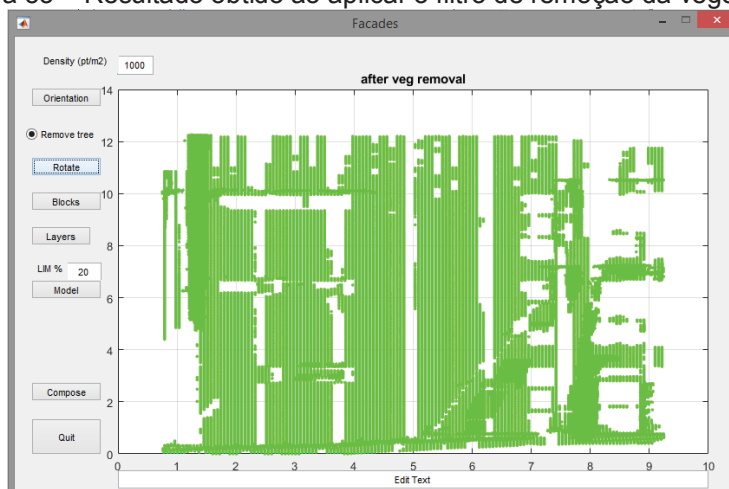
Figura 52 – Edificação do Experimento 2. Destacados em amarelo, tem-se a vista área da mesma e em vermelho, a nuvem de pontos TLS.



Fonte: O autor (2019).

Esta cena é composta pela edificação e por alguns arbustos à frente da fachada. Neste caso, o processo de remoção foi feito manualmente para evitar incoerências na rotina. Como a identificação da vegetação é realizada baseada na densidade de pontos esperada para uma edificação, o código consegue identificar apenas as vegetações que se encontram em uma área livre, ou seja, onde não haja edificações ao fundo. Caso a vegetação esteja à frente da edificação, o algoritmo entendera que como a densidade de pontos é alta, a área em questão se trata de uma edificação. Neste exemplo, viu-se que quando a função para remoção de árvores está ativada, pontos importantes da edificação foram removidos, obtendo um resultado incompatível com a realidade, conforme Figura 53.

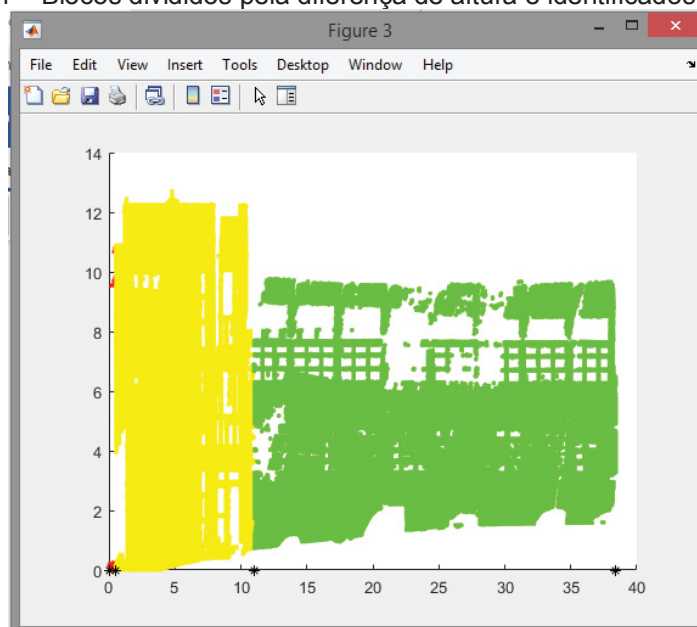
Figura 53 – Resultado obtido ao aplicar o filtro de remoção da vegetação.



Fonte: O autor (2019).

Desta forma foi dada sequência na metodologia sem a utilização da função de remoção da vegetação. Aplicando Morfologia Matemática no perfil da cena e utilizando o critério de diferença de altura, anteriormente explicados, foram definidos 3 blocos, sendo um deles composto por apenas por ruídos.

Figura 54 – Blocos divididos pela diferença de altura e identificados por cores.

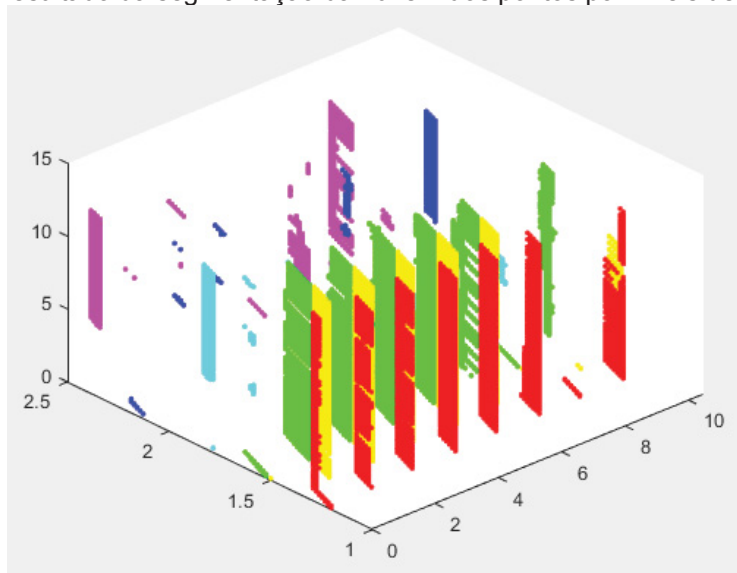


Fonte: O autor (2019).

A partir dos blocos, foram definidos os planos referentes à cada um deles. O Bloco 1, em vermelho, foi descartado por apresentar pontos que não eram referentes

à edificação. Já para os Blocos 2 e 3 foram definidos seis planos com um passo igual à 0.05m, ou seja, seis níveis de profundidade, conforme Figura 55.

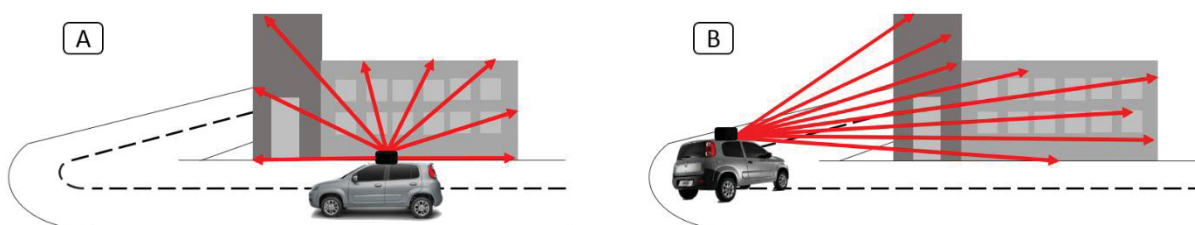
Figura 55 – Resultado da segmentação da nuvem dos pontos por níveis de profundidade.



Fonte: O autor (2019).

Neste experimento não foi possível realizar a modelagem 3D da edificação, devido à forma como os dados foram coletados. Na figura acima, percebe-se que as faixas de varredura laser não se encontram paralelas ao eixo X. Tal realidade não consegue ser interpretada pelo algoritmo proposto, ou seja, a rotina é ideal apenas para a nuvem de pontos que foi coletada em frente à edificação, como mostrado na Figura 56.

Figura 56 - (a) situação ideal (b) situação não ideal.

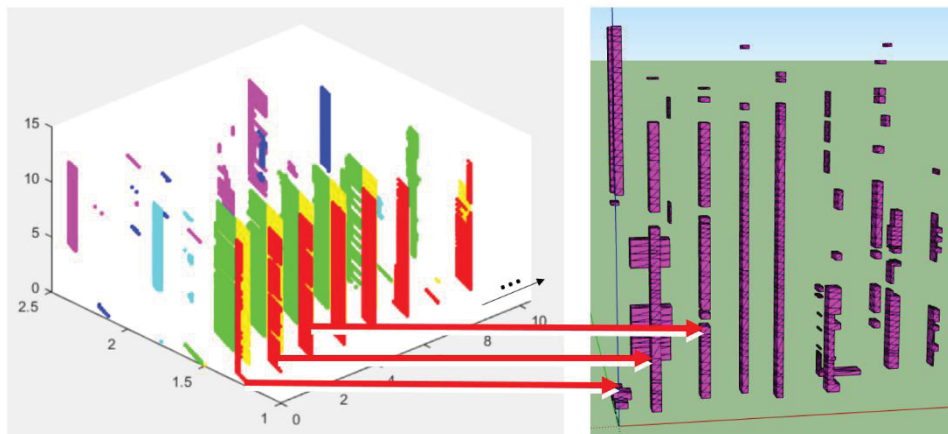


Fonte: O autor (2019).

Desta maneira, os blocos gerados serão modelados apenas no início da faixa, dando origem à pequenos pilares ao invés de blocos contínuos ao longo da fachada, conforme mostra a Figura 57. Diante dos motivos apresentados, não foi possível

identificar padrões, formas e feições que fornecessem subsídios para realizar a modelagem 3D desta edificação.

Figura 57 – Tentativa de geração dos blocos 3D a partir da segmentação por níveis de profundidade.



Fonte: O autor (2019).

4.3. Experimento 3

A terceira cena conta com uma fachada de aproximadamente 40m de comprimento localizada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (Figura 58).

Figura 58 - Edificação do Experimento 3.

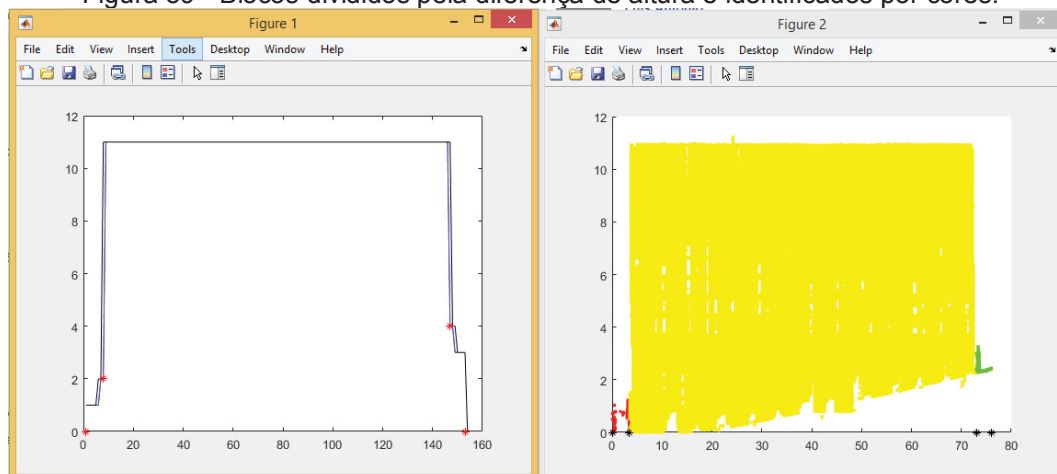


Fonte: O autor (2019).

Aplicando a rotina, foram definidos os blocos de fachada presentes na cena. Neste exemplo foram encontrados 3 blocos, sendo apenas 1 deles correspondente à

edificação (amarelo). Os demais blocos podem ser considerados ruídos, visto que a edificação possui formato retangular.

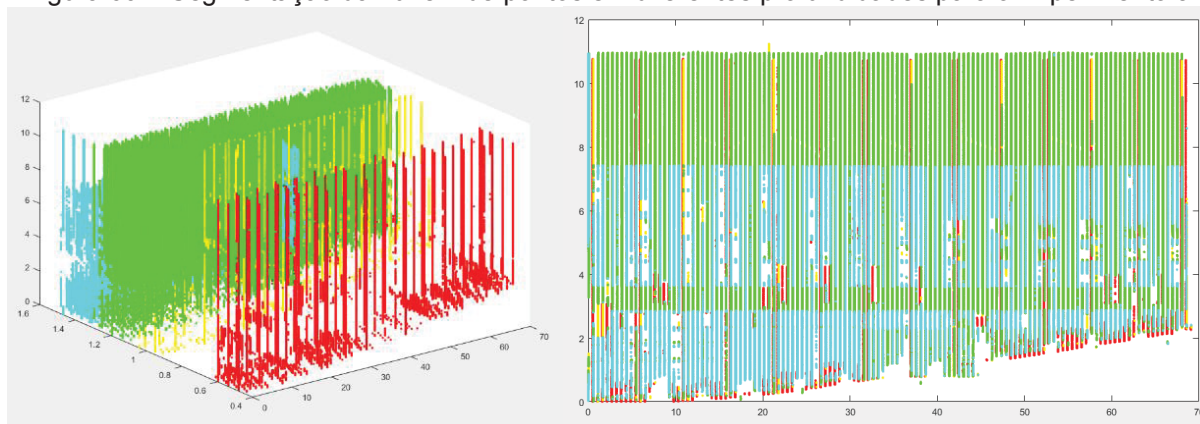
Figura 59 - Blocos divididos pela diferença de altura e identificados por cores.



Fonte: O autor (2019).

Em sequência, utilizando o mesmo passo que nos demais experimentos, ou seja, um passo igual à 0.05, obteve-se quatros planos de fachada, conforme Figura 60. Neste resultado é evidente a definição dos pilares e dos ares-condicionados, em vermelho, e o plano principal da fachada, em verde. Os pontos classificados em azul são referentes à estrutura das janelas e de pontos coletados no interior do prédio.

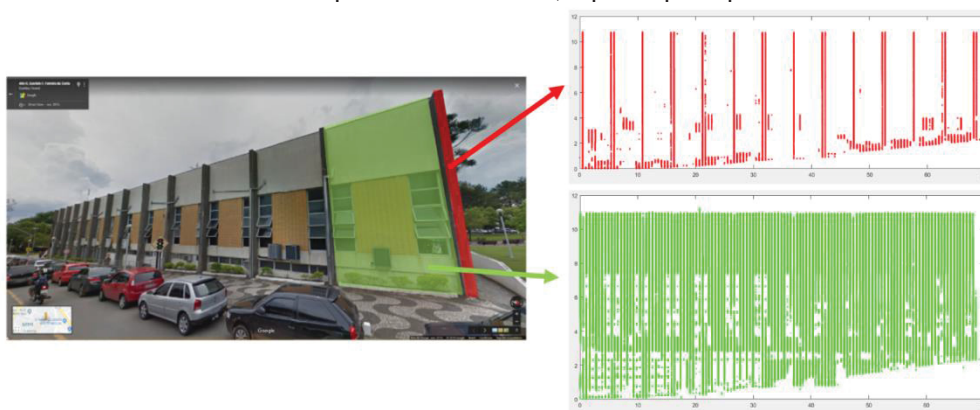
Figura 60 - Segmentação da nuvem de pontos em diferentes profundidades para o Experimento 3.



Fonte: O autor (2019).

A qualidade da segmentação foi comprovada analisando a edificação em campo, onde se vê na Figura 61 os pilares vermelhos à frente e a parede em verde ao fundo.

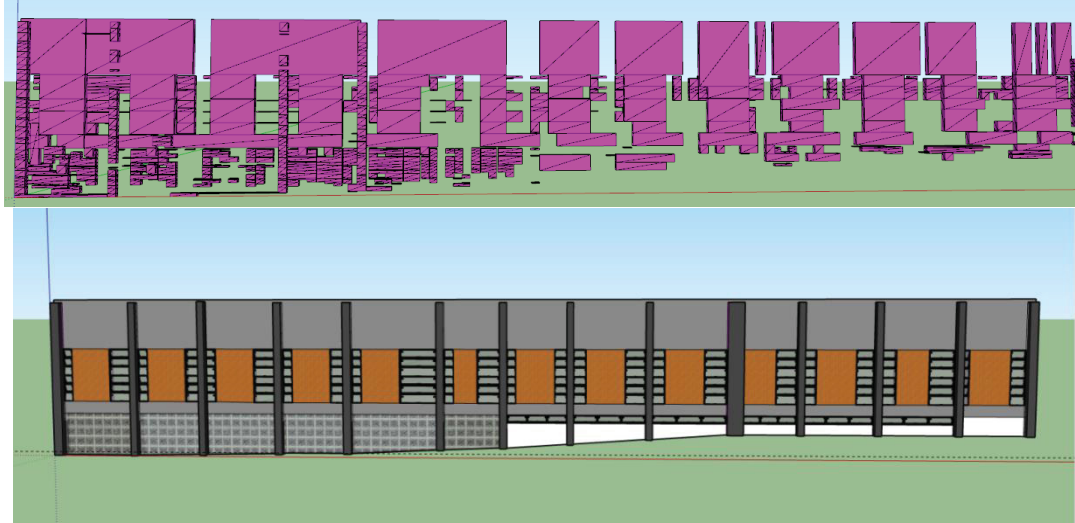
Figura 61 – Comparação da segmentação da nuvem de pontos com a imagem real da fachada. Pontos em vermelho pilares e em verde, o plano principal da fachada.



Fonte: O autor (2019).

Após a geração dos blocos e exportação para o Sketchup, fez-se o processo manual de modelagem para finalização e acabamento, inserindo janelas e texturas. O resultado do experimento pode ser visto na Figura 62.

Figura 62 - Resultado do Experimento 3: (a) Bloco gerado inicialmente e (b) bloco finalizado.

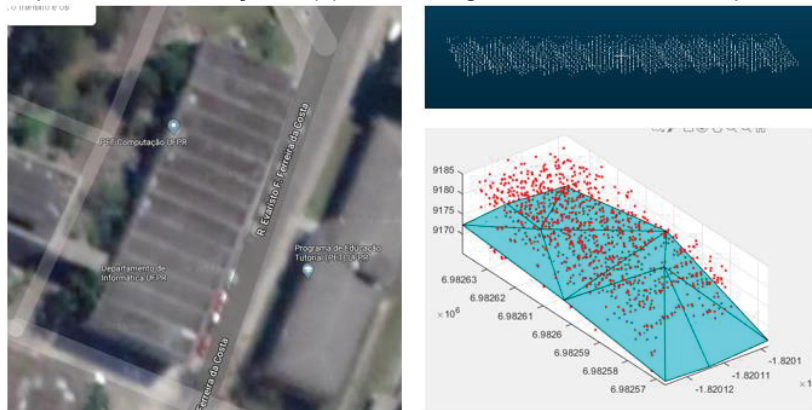


Fonte: O autor (2019).

Em relação à modelagem de telhados desta edificação, percebeu-se que a geometria encontrada era bastante complexa. Vê-se a partir da comparação entre a nuvem de pontos e a imagem aérea da edificação, que este telhado é composto por formas retangulares inclinadas dispostas horizontalmente ao longo do prédio. Sendo assim, a rotina criada não consegue interpretar este tipo de situação, resultando em

um modelo que não condiz com a realidade. Uma solução para tal experimento é utilizar um padrão retangular de forma genérica e aplica-lo sobre o modelo de fachada.

Figura 63 – Análise do telhado da Edificação 3: (a) Imagem de satélite do prédio (Google Earth), (b) Nuvem de pontos da edificação e (c) resultado genérico obtido com o processamento.



Fonte: O autor (2019).

4.4. Experimento 4

A quarta edificação se trata de um dos blocos do Restaurante Universitário da Universidade Federal do Paraná, sendo composto por um bloco regular que se assemelha a um paralelepípedo (Figura 64).

Figura 64 – Edificação do Experimento 4.



Fonte: O autor (2019).

Por possuir uma geometria regular, foi possível reconstruir o bloco sem muitos esforços. Durante o processamento foram identificados três blocos de fachada, sendo dois deles referentes à ruídos da edificação presente ao fundo. Logo após, obteve-se

as seguintes faixas de profundidade: a primeira referente à fachada principal, a segunda à pilares internos e a terceira à ruídos coletados devido à transferência das janelas de vidro.

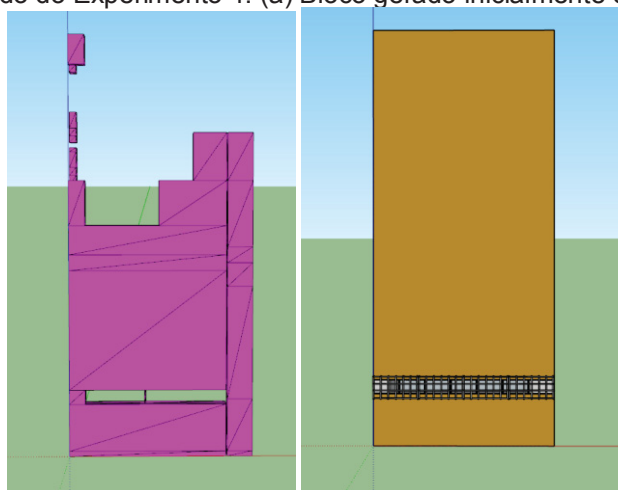
Figura 65 - Indicação dos pilares internos do bloco.



Fonte: O autor (2019).

Após finalizar manualmente o modelo da fachada, inserindo cor e objetos, obteve-se o resultado abaixo. Ressalta-se que a profundidade total da edificação (parte branca) não foi levada em consideração e aplicada apenas para tornar o modelo mais realista.

Figura 66 - Resultado do Experimento 4: (a) Bloco gerado inicialmente e (b) bloco finalizado.



Fonte: O autor (2019).

Quanto à modelagem de telhados, esta não foi possível de ser realizada para os experimentos 4 e 5 devido à falta de dados de LiDAR aéreo. Isto ocorreu devido ao levantamento LiDAR aqui utilizado foi realizado numa data anterior à construção de tais edificações.

4.5. Experimento 5

A última edificação de estudo se trata de uma fachada mais moderna, com mais recortes e diferentes níveis de profundidade. Ela também se encontra dentro do Campus Politécnico da Universidade Federal do Paraná e é sede da Divisão do patrimônio da universidade (Figura 67).

Figura 67 – Edificação do Experimento 5.

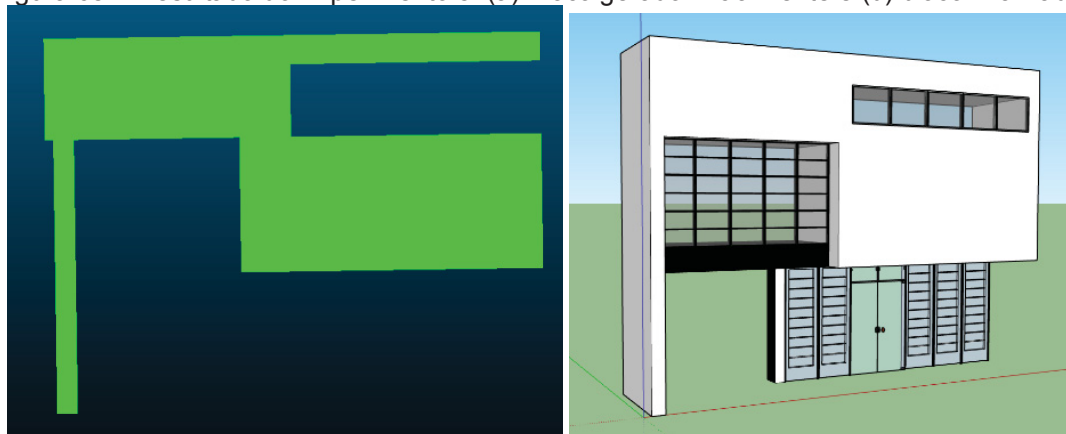


Fonte: O autor (2019).

Neste experimento foram identificados dois blocos, o primeiro referente à edificação de estudo e o segundo referente à lateral da segunda parte do prédio. Como a nuvem foi anteriormente recortada, apenas um bloco estava inteiramente escaneado. Por este motivo, prosseguiu-se com a modelagem apenas deste.

Em sequência, foram obtidos seis níveis de profundidade, havendo três níveis mais relevantes referentes as feições principais da fachada e outros três coletados dentro da edificação pelos vidros presentes na mesma. Por este motivo, o modelo foi gerado desconsiderando as faixas referentes aos ruídos e mantendo apenas as que possuíam maior semelhança com a fachada real, obtendo o resultado mostrado na Figura 68.

Figura 68 – Resultado do Experimento 5: (a) Bloco gerado inicialmente e (b) bloco finalizado.



Fonte: O autor (2019).

4.6. COMPATILIZAÇÃO PARA BIM

Nos últimos anos houve uma crescente demanda no ramo AEC para implementação do uso de modelagem BIM, por causa dos benefícios comprovados e real economia de recursos durante todo processo: projeto, planejamento e construção de edificações (Volk et al., 2013). Evidencia-se ainda a importante contribuição da Tecnologia da Informação (TI) para a qualidade dos projetos (CRUZ, 2004), sabendo que os softwares permitiram uma maior facilidade no cálculo, maior precisão, ousadia e redução de tempo de desenvolvimento (HIPPERT & ARAUJO, 2010). Sendo assim, a busca pelo refinamento dos projetos ajuda a fomentar a tecnologia BIM, bem como disseminar esta tecnologia pela sociedade.

Dentre os benefícios desta solução, cita-se a consistência e visualização do modelo, previsão de custos com precisão, detecção de problemas e melhor colaboração das partes interessadas. Porém a inserção de uma nova tecnologia, gera impacto no setor, trazendo consigo alguns desafios, como a mudança na forma de trabalho, resistência aos sistemas e interfaces dos novos softwares e mais tempo necessário para adaptação dos profissionais ao novo processo. (Volk et al., 2013).

No geral, o emprego do BIM na indústria de construção foi impulsionado pelo desenvolvimento de novas ferramentas CAD, apesar de se saber que o BIM não se limita a isto. Hilgenberg et al. (2012) colocam que os primeiros softwares lançados no mercado na década de 80, dando destaque ao Allplan e o ArchiCAD. Recentemente, outros softwares comerciais mais específicos foram lançados, como o Bentley, Solibri, Robot, Navisworks, Trimble Vico Office e o Revit. Porém existem ainda algumas ferramentas livres, como o Blender 3D, SketchUp BIM Tools e o VisualPV3D, que são

gratuitas e ocupam menos espaço no disco rígido. Abaixo, se encontra um resumo das principais ferramentas BIM.

QUADRO 6 – Principais softwares BIM.

SOFTWARE	DESCRIÇÃO
Autodesk Revit	Especificamente para Building Information Modeling (BIM). Combina as capacidades do AutodeskRevit Architecture, AutodeskRevit MEP e AutodeskRevit Structure.
ArchiCAD	Combinação de BIM e CAD, possibilitando reunir aspectos arquitetônicos e de engenharia durante todo o processo.
Autodesk Navisworks	Características semelhantes aos anteriores, porém com ênfase na gestão e simulação da obra.
Bentley Architecture	Ferramenta BIM que permite a criação de edifícios, combinando modelos de diferentes áreas.

Fonte: Adaptado de Hilgenberg et al. (2012).

A ferramenta Revit teve criação na década de 90, e posteriormente foi comprada e difundida pela Autodesk, tornando-a uma das referências no conceito BIM (Costa et al., 2015). Possui uma interface composta pelos setores *Architecture*, *Structure* e *System for mechanical, electrical and plumbing*, com o diferencial de compartilhar modelos sincronizados e possibilitar uma comunicação mais assertiva através de visualizações mais eficazes para seus proprietários e demais membros (Autodesk, 2018).

Este software permite ainda a modelagem de componentes construtivos, análise e simulação de sistemas e estruturas, além da colaboração de projetos interdisciplinares, diminuindo interferências e retrabalhos. Uma das diferenças do sistema CAD é que a ferramenta BIM não apresenta blocos, mas sim, apresenta objetos, comumente, caracterizados como famílias, que armazenam informações técnicas específicas dos materiais de construção, permitindo também estimativas de cálculo e custos da obra. A partir disso, pode-se gerenciar com detalhes todo o andamento de um projeto, da fase preliminar até a representação final com o modelo 3D.

Neste sentido, a aplicação do modelo gerado em projetos BIM pode se iniciar pela conversão do arquivo para o formato .ifc, que se trata de um formato mundial de dados aberto e não proprietário de arquivos de modelagem que conversa com diversos softwares. Sendo assim, lista-se abaixo algumas soluções para realizar a conversão de formatos para o .ifc, utilizado por exemplo, pelo Revit.

QUADRO 7- Soluções para converter arquivos para o .ifc .

Solução	Aplicação
usBIM.viewer+	Software gratuito utilizado para a comunicação na plataforma das várias equipes que colaboram à definição do modelo BIM. Ele permite visualizar, alterar, converter e exportar documentos IFC2x3 a partir de arquivos dwg e outros arquivos de modelos 3D de AutoCAD® (.dwg), SketchUp (.skp), 3D Studio Max® (.3ds).
SketchUp Pro	Nesta versão é possível exportar um arquivo .ifc diretamente do Sketchup.
SimLab SketchUp Exporter	Plug-in capaz de exportar modelos de Revit para o SketchUp.
SimLab IFC Importer	Extensão indicada para quando se deseja realizar o processo inverso, ou seja, importar um arquivo .ifc no Sketchup.
Flux.io	Plataforma que permite por um modo dinâmico de se fazer a troca de informações entre programas, como o Revit e Sketchup. Neste caso, o que se transmite, entre arquivos .SKP e .RVT, são dados relacionados à construção geométrica de elementos, no qual ao se alterar a geometria em um deles, a mesma é alterada automaticamente no outro software.

Fonte: O autor (2019).

5. CONCLUSÃO

Para a análise e compreensão da história das cidades e da sociedade, a arquitetura tem papel relevante por servir como referência urbana e materializar nas edificações, os modos de vida e de construção de uma época. Nesse sentido, entende-se que as formas arquitetônicas devem ser devidamente documentadas e inventariadas. O trabalho de inventário do patrimônio arquitetônico é a principal ferramenta de documentação e cria um amplo panorama dos bens arquitetônicos de uma localidade. Devido a isto, novas tecnologias vêm sendo empregadas e adaptadas para suprir tais necessidades, o que impulsiona o estudo e desenvolvimento de novas metodologias.

Este estudo apresentou os resultados da integração de duas tecnologias LiDAR para modelagem tridimensional de edifícios existentes, no qual a metodologia proposta se mostrou eficiente para a reconstrução semiautomática de edificações. Baseado na definição de LoD (Level of Detail), pode se considerar que o modelo criado atinge um nível de detalhamento 3, numa escala LOD3.1, obtendo a representação da edificação com as formas da fachada e suas variações de altura e profundidade, a localização das portas e janelas, e a modelagem do telhado.

É importante destacar que a metodologia utilizada garante um ganho de tempo em relação aos métodos tradicionais. Isso ocorre por dois motivos: A) o levantamento LiDAR, seja terrestre ou aéreo, garante a coleta de informações de uma cena de forma detalhada em poucos segundos; B) o processo proposto traz a automação da etapa de modelagem de edificações, otimizando o tempo gasto nesta fase.

Apesar de ser mais caro quando se comparado ao levantamento por fotos ou técnicas convencionais, a metodologia tem o diferencial de aproveitar as informações tridimensionais da nuvem de pontos para criar blocos em diferentes profundidades, garantindo a qualidade do modelo gerado. Isto não é possível realizar com confiabilidade mediante o uso apenas de uma simples foto, por exemplo.

Por fim, vê-se que o modelo resultante possui potencial para ser adaptado e utilizado em projetos que envolvam a gestão BIM. Porém, vale destacar que o levantamento das demais especificidades da edificação para geração de um modelo BIM completo, como os aspectos hidráulicos, elétricos e estruturais, devem ser obtidas por outras técnicas de sensoriamento.

Vê-se que para o sucesso da metodologia é essencial que a etapa de orientação da nuvem de pontos seja realizada, projetando os pontos nos eixos principais e tornando a fachada paralela ao eixo X. Isso garante com que se consiga recuperar as principais feições da fachada ao longo de sua profundidade.

Em relação à retirada vegetação na etapa de processamento nota-se que é válida se fazer de forma automática quando a mesma não estiver à frente da edificação que se deseja modelar. Caso isso aconteça, a vegetação deve ser retirada da nuvem de pontos de forma manual, pois se mantida, acarretará em ambiguidade na segmentação de feições da fachada.

Ressalta-se que a metodologia proposta apresenta resultados satisfatórios quando aplicada a edificações que seguem um padrão geométrico regular, ou seja, que possuem faces retangulares. Sendo assim, na etapa de separação por blocos de fachada, pode não ser possível separar os blocos utilizando-se a análise angular em edificações com formas curvas.

Quanto à trabalhos futuros, recomenda-se:

- Testar a aplicabilidade da técnica para diferentes realidades, tanto de formas de fachada quanto de telhado;
- Definir limiares que sejam compatíveis com grande parte das fachadas existentes, a fim de criar um algoritmo mais genérico e aplicável a diversas realidades;
- Criar uma biblioteca com blocos pré-definidos para objetos comuns em edificações, como portas e janelas, sendo estes apenas redimensionados de acordo com a fachada;
- Combinar a metodologia com outras fontes de dados, por exemplo, fotografias terrestres e aéreas, e desenvolver metodologias que extraiam a informação espectral e a correlacione a um tipo de coloração ou material a ser inserido automaticamente no modelo.

REFERENCIAS

ALJUMAILY, H., D. F. LAEFER, D. CUADRA. **Big-data approach for three-dimensional building extraction from aerial laser scanning**. J. Comput. Civ. Eng. 2015.

ALJUMAILY, H., D. F. LAEFER, D. CUADRA. **Urban point cloud mining based on density clustering and MapReduce**. J. Comput. Civ. Eng. 2017.

AKCAMETE, A.; AKINCI, B.; GARRET Jr, J. H. **Potential utilization of building information models for planning maintenance activities**. International conference computing in civil and building engineering, Nottingham, 2010.

AMISSE, C. **Modelagem 3d de telhados de edificações singulares a partir de imagens UAV para estimativa do potencial fotovoltaico e coleta de água pluvial**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná; 2016.

ANDRADE, M. L. V.; RUSCHEL, R. C. **BIM: conceitos, cenário das pesquisas publicadas no Brasil e tendências**. Anais do Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído. São Carlos, SP. 2009.

AUTODESK. **Products Revit Family**. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/revitfamily/overview?geoNavigationPreferredSiteUS>>. Acesso em dezembro de 2018.

AWRANGJEB, M.; ZHANG, C. FRASER, C. S. **Automatic reconstruction of building roofs through effective integration of Lidar and multispectral imagery**. In: XXII ISPRS Congress, 2012, Melbourne. Proceedings v. I-3, Melbourne, 2012.

AXELSSON, P. **Processing of Laser Scanner Data – Algorithms and Applications**. ISPRS Journals of Photogrammetry and Remote Sensing. 1999.

BALTSAVIAS, Emmanuel. **Airborne laser scanning: basic relations and formulas**. ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, v. 54, n. 2, p. 199-214, 1999.

BARBOSA, L. J. ; GALO, M. **Extração de edificações a partir de dados LiDAR após classificação utilizando a biblioteca LAStools e segmentação por crescimento de regiões**. XXVI Congressde Iniciacao Cientifica da Unesp. Presidente Prudente, 2004.

BELTON, D.; LICHTI, D. **Classification and segmentation of terrestrial laser scanner point clouds using local variance information**. Proceedings, ISPRS Commission V Symposium “Image Engineering and Vision Metrology”, 2006.

BIAGINI, Carlo. **Towards the BIM implementation for historical building restoration sites**. Automation In Construction, [s.l.], v. 71, p.74-86, nov. 2016.

BIMFORUM. **Level Of Development Specification**. 2013.

BIMLab. **Nível de Detalhamento / ND / LOD – Parte 1**. Disponível em: <<http://www.bimlab.com.br/arquivos/130>>. Acessado em: dezembro de 2018.

BÖHM, J., BECKER, S., HAALA, N. **Model refinement by integrated processing of laser scanning and photogrammetry**. ISPRS, Proceedings of the 2nd ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2007.

BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P., TARSHA-KURDI, F. **Automatic segmentation of building facades using terrestrial laser data**. International Symposium of Photogrammetry and Remote Sensing - ISPRS, Workshop on laser scanning 2007 and SilviLaser 2007.

BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. **Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner**. International Journal of Architectural Computing - IJAC, Volume 7, Number 1, 2009.

BRETAR, F.; ROUX, M. **Extraction of 3D planar Primitives from Raw Airborne Laser Data: a Normal Driven RANSAC Approach**. In: IAPR Conference on Machine Vision Applications, May 16-18, 2005 Tsukuba Science City, Japan, 2005.

BRIESE, C., PFEIFER, N. **Line based reconstruction from terrestrial laser scanning data**. Journal of Applied Geodesy. Volume 2, pp 85 – 95, 2008.

BROWN, M.A., SOUTHWORTH, F., STOVALL, T.K. **Towards a Climate-friendly Built Environment**, Pew Center on Global Climate Change: Oak Ridge National Laboratory, 2005.

CAMPBELL, D.A. **Modeling Rules**. Architecture Week. Design Tools, p. T1.1, 2006.

CAMPIOTTO, R. C. **O levantamento métrico-arquitetônico na conservação do patrimônio**. Projeto de desenvolvimento do Plano de Gestão da Conservação da FAUUSP, 2016.

CHEN, L.; PAPANDREOU, G.; KOKKINOS, I.; MURPHY, K.; YUILLE, A. L. **Deeplab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected**. 2016.

COELHO, S. S.; NOVAES, C. C. **Modelagem de informação para construção (BIM) e ambientes colaborativos para gestão de projetos na construção civil**. Workshop Brasileiro - Gestão do processo de projetos na construção de edifícios, 8, São Paulo, 2008.

COHEN, A.; SCHWING, A. G.; POLLEFEYS, M. **Efficient structured parsing of facades using dynamic programming**. June 2014.

COSTA, G. C. L. R.; FIGUEIREDO, S. H.; RIBEIRO, S. E. C. **Estudo comparativo da tecnologia CAD com a tecnologia BIM**. Revista de Ensino de Engenharia, 2015.

CRUZ, R. C.; QUALHARINI, E. **A qualidade da informação dos desenhos do projeto de estrutura de concreto armado**. Workshop Brasileiro de Gestão do Processo de Projeto, Rio de Janeiro, 2004.

CZMOCH, I.; PEKALA, A. **Tradicional design versus BIM based design**. Procedia Engineering, Elsevier, 2014.

DEVEAU, M. **Utilisation conjointe de données image et laser pour la segmentation et la modélisation 3D**. Tese. Universidade René Descartes Paris, 2006.

DESCHAUD, J.-E., GOULETTE., F. **A fast and accurate plane detection algorithm for large noisy point clouds using filtered normals and voxel growing**. In: Proceedings of 3D Processing Visualization and Transmission Conference, Paris, France. 2010.

DEZEN-KEMPTER, E. et al. **Escaneamento 3D a laser, fotogrametria e modelagem da informação da construção para gestão e operação de edificações históricas**. Gestão e Tecnologia de Projetos, v. 10, n. 2, p. 113–124, 2015.

DOCCI, M; MAESTRI, D. **Il Rivelamento architettonico. Storia, Metodi e Disegno**. Ed. Laterza & Figli. Roma, Bari 1987.

EASTMAN, C. **The use of computers instead of drawings**. AIA Journal, v. 63, n. 3, p. 46-50, March 1975.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM Handbook : A guide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors**. John Wiley and Sons, 2008.

EASTMAN, C. **Manual de BIM: Um Guia de Modelagem da Informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores**. Bookman, 2013. 483p.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **Manual de Bim: Uma Guia de Modelagem da Informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Construtores e Incorporadores**. 1ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. 483p.

FERREIRA, F. R. **Segmentação do espaço urbano por meio da tecnologia Lidar aerotransportado**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014, 129p

FIESP - FEDERAÇÃO DAS INDUSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Subsídios para uma política industrial para a Construção Civil – edificações**. Relatório Final – (versão beta). 2008.

FILIN, S.; PFEIFER, N. **Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006.

FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. **Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography**. Communications of the ACM 1981.

FONSECA, F. H.; Bertoncini, A. L. S.; LINO, A. **Uso da Tecnologia LiDAR no Cadastro 3D: a determinação do Potencial Adicional de Construção**. 24 SIC UDESC. 2016.

FRANK, R. **BIM está mudando a maneira de projetar no mundo inteiro**. PINIWeb, São Paulo, Noticiário Arquitetura. 2008.

FRUEH C., SAMMON R., ZAKHOR A. **Automated Texture Mapping of 3D City Models With Oblique Aerial Imagery**. 3D Data Processing, Visualization and Transmission. 2nd International Symposium, 2004.

GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E. **Processamento Digital de Imagens Digitais**. Editora Edgard Blücher LTDA. 2000.

GROETELAARS, N. J. **Um Estudo da Fotogrametria Digital no Estudo das Forma Arquitetônicas e Urbanas**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFBA. Salvador, Bahia; 2004.

HAALA, N.; BRENNER, C.; ANDERS, K.-H. **Urban GIS from Laser Altimeter and 2D Map Data**. IAPRS 32, pp. 339-346, 1998.

HERNÁNDEZ, J., MARCOTEGUI, B. **Point cloud segmentation towards urban ground modeling**. 5th GRSS/ISPRS Joint Urban Remote Sensing Event (URBAN2009). China, 2009.

HILGENBERG, F. B.; ALMEIDA, B. L.; SCHEER, S.; AYRES FILHO, C. **Uso de BIM pelos profissionais de arquitetura em Curitiba**. Revista Gestão e Tecnologia de Projetos. São Paulo, SP: USP, 2012.

HIPPERT, M. A. S.; ARAUJO, T. T. **BIM e a qualidade do projeto: um estudo de caso em uma pequena empresa de projeto**. XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Canela, 2010.

IME-USP. **Componentes conexas**. Disponível em: <
https://www.ime.usp.br/~pf/algoritmos_para_grafos/aulas/components.html>.
Acessado em: julho de 2019.

JARZABEK-RYCHARD, M.; BORKOWSKI, A. **3D building reconstruction from ALS data using unambiguous decomposition into elementary structures**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 118, p. 1-12, 2016.

JOCHEM, A.; HOFLE, B.; WICHMANN, V.; RUTZINGER, M. & ZIPF, A. **Area-wide roof plane segmentation in airborne LiDAR point clouds**. Computers, Environment and Urban Systems, v. 36, n. 1, p. 54-64, 2012.

KALE; ARDITI D. **Diffusion os computer aided design technology em architectural practice**. Journal of Construction Engineering and Management (ASCE), v. 131, p.1135-1141, 2005.

KABOLIZADE, M.; EBADI, H.; MOHAMMADZADEH, A. **Design and implementation of an algorithm for automatic 3D reconstruction of building models using genetic algorithm**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 19, p. 104-114, 2012.

KIM, K. ; SHAN, J. **Building roof modeling from airborne laser scanning data based on level set approach**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 66, 2011.

LAFARGE, F. **Automatic building extraction from DEMs using an object approach and application to the 3D-city modeling**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002.

LEÃO, M. **Tecnologias BIM na gestão de empreendimentos na construção civil**. FACET - UNEMAT, 2013.

LEE, I.; SCHENK, T. **Perceptual organization of 3D surface points**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34, 193-198. 2002.

LONG, J.; SHELHAMER, E.; DARRELL, T. **Fully convolutional networks for semantic segmentation**. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 3431–3440, 2015.

MAAS, H. G. ; VOSSELMAN, G. **Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data**. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, v. 54: p. 153–163, 1999.

MATHIAS, M.; MARTINOVIC, A.; L. V. GOOL. **ATLAS: A three-layered approach to facade parsing**. International Journal of Computer Vision, 118(1):22–48, 2016.

MEDINA, S. **Análise de Produtos Fotogramétricos para Cadastramento de Monumentos Históricos**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2012.

MENEZES, G. L. B. **Breve histórico de implantação da plataforma BIM**. Cadernos de Arquitetura e Urbanismo, v.18. n.22, 2011, p. 155-157.

NARDINOCCHI, C; FORLANI, G.; ZINGARETTI, P. **Classification and filtering of laser data**. International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing. 2003.

NASCIMENTO, L. A.; SANTOS, E. T. **A indústria da construção na era da informação**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 3, n. 1, p. 69-81, 2003.

NURUNNABI, A.; BELTON, D.; WEST, G. **Robust segmentation in laser scanning 3D point cloud data**. In: Proceedings of 2012 International Conference on Digital Image Computing Techniques and Applications (DICTA), IEEE, Australia. 2012.

OLIVEIRA, H. N. B. Segmentação e classificação de imagens LANDSAT TM. Dissertação (Mestrado em Informática), Universidade Federal do Paraná, 1999.

OPTECH INC. **PEGASUS HD500**. Summary Specification Sheet. Brochure. Vaughan, Ontario, Canada. 2015.

ORTHUBER, E.; AVBELJ, J. **3D building reconstruction from lidar point clouds by adaptive dual contouring**. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 2, n. 3, p. 157, 2015.

PARK, J., LEE, I. Y., CHOI, Y., LEE, Y. J. **Automatic extraction of large complex buildings using lidar data and digital maps**. International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing XXXVI (3/W4), 148–154, 2006.

PÄRN, E. A.; EDWARDS, D. J.; SING, M. C. P. **The building information modelling trajectory in facilities management: A review**. Automation in Construction, v. 75, n. December 2017.

PFEIFER N., BRIESE C. **Laser scanning – principles and applications**. GeoSiberia– International Exhibition and Scientific Congress, 2007.

PEREIRA, L. G. **Varrimento por laser: estado da arte e aplicações**. Universidade de Aveiro, 2011.

PEIXOTO, E. B. A. **Detecção e identificação automática de postes utilizando nuvem de pontos do sistema laser terrestre móvel**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, 2016.

PISSARA, N. M. M. **Utilização de Plataformas Colaborativas para o Desenvolvimento de Empreendimentos de Engenharia Civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

PU, S., VOSSELMAN, M.G. **Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, 5 pages. 2006.

PU, J. **Adaptive border marching algorithm: Automatic lung segmentation on chest ct images**. Computerized Medical Imaging and Graphics, v.32, 2008.

PU, S., VOSSELMAN, M.G. **Building façade reconstruction by fusing terrestrial laser points an images**. Sensors, volume 9, pp 4525 – 4542, 2009.

RABBANI, T., VAN DEN HEUVEL, F. A., VOSSELMAN, G. **Segmentation of point clouds using smoothness constraints**. In: Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS). (Germany, 2005).

RABBANI, T.; HEUVEL, F. V. D. ; G. VOSSELMAN, M. G. **Segmentation of point clouds using smoothness constraints**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, 248-253.

ROTTENSTEINER, F. **Automatic generation of high-quality building models from LiDAR data**. IEEE Computer Graphics and Applications, v. 23, 2003.

ROTTENSTEINER, F., TRINDER, J., CLODE, S., KUBIK, K. **Fusing airborne laser scanner data and aerial imagery for the automatic extraction of buildings in densely built-up areas**. In: Proc. ISPRS Twentieth Annual Congress. Istanbul, Turkey, pp. 512–517, 2004.

RUIZ, J. M. **BIM Software evaluation model for general contractors**. 115f. Dissertação (Master of Science em Engenharia), University of Florida, 2009.

SABARIEGO, N. **Modelagem de telhados a partir de nuvem de pontos lidar utilizando algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, 2018.

SAKAMORI, M. M. **Modelagem 5d (BIM) - Processo de orçamentação com estudo sobre controle de custos e valor agregado para empreendimentos de construção civil**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em engenharia de construção civil – PPGECC. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

SALES, A. A.; RUSCHEL, R. **BIM no suporte a avaliação pós-ocupação**. Anais do XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Maceió, 2014.

SAMPATH, A.; SHAN, J. **Segmentation and Reconstruction of polyhedral Building Roofs From Aerial LiDAR Point Clouds**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 48. 2010.

SANTOS, E. T. **BIM - Building Information Modeling: um salto para a modernidade na Tecnologia da Informação aplicada à Construção Civil**. Faculdade de Tecnologia da UNB, Brasília, 2012. p. 25-62.

SAPKOTA, P. P. **Segmentation of Coloured Point Cloud Data**. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands, 2008.

SCHMITZ, M.; MAYER, H. **A convolutional network for semantic facade segmentation and interpretation**. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pages 709–715, 2016.

SCHNABEL, M. A; KVAN, T.; KUAN, S. K.S.; LI, W. **3D Crossover: Exploring Objets digitalisé**. International Journal of Architectural Computing (IJAC), 2004.

SCHNABEL, R.; WAHL, R.; KLEIN, R. **Efficient RANSAC for point- cloud shape detection**. In: Computer graphics forum (Vol. 26, No. 2, pp. 214-226). 2007.

SOUZA, D. L.; PINILLA, S. M.; TIBURCIO, T. M.S; VALLEJO, M. A. B. MILLAN, L. F. A. **Processo de registro e modelagem de preexistências com uso de escaner laser terrestre**. IV Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído. Viçosa, 2015.

TARSHA-KURDI, M., REHOR, M., LAMDES, T., GRUSSEMEYER, H., BAHR, P. **Extension of Automatic Building Extraction Technique to Airborne Laser Scanner data Containing Damaged Building**. International Symposium of Photogrammetry Remote Sensing – ISPRS. Proceeding XXXVI – W51, 2007.

TEBOUL, O. ; SIMON, L. ; KOUTSOURAKIS, P. ; NIKOS, P. **Segmentation of building facades using procedural shape priors**. In Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) - IEEE Conference on, pages 3105–3112. IEEE, 2010.

TOMMASI, C. ; ACHILLE, C. ; FASSI, F. **From point cloud to BIM: a modelling challenge in the cultural heritage field**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B5, XXIII ISPRS Congress. Prague, Czech Republic, 2016.

TOVARI, D.; PFEIFER, N. **Segmentation based robust interpolation – a new approach to laser data filtering**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2005.

VERMA, V.; KUMAR, R.; HSU, S. **3D Building detection and modeling from aerial LiDAR data**. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington, D.C., 2006.

VO, A.V. ; TRUONG-HONG, L. ; LAEFER, D.F. ; BERTOLOTTO, M. **Octree-based region growing for point cloud segmentation**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 104, 88-100, 2015.

VOLK, R.; STENGEL, J.; SCHULTMANN, F. **Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – literature review and futures needs**. Automation in Construction, Elsevier, 2013.

VOLK, R., STENGEL, J. AND SCHULTMANN, F. **Building Information Modeling for Existing Buildings - Literature Review and Future Needs**. Automation in Construction, 38,109-127, 2014.

VOSSelman, G. ; DIJKMAN, S. **3D Building model reconstruction from point clouds and ground plans**. International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV-3/W4, Annapolis, 2001.

VOSSelman, M.G., GORTE, B.G.H., SITHOLE, G., RABBINI, T. **Recognizing structure in laser scanning point cloud**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, part. 8. Freiburg, Germany, 2004.

WANG, M., TSENG, Y.H. **Incremental Segmentation of lidar point clouds with an octree- structured voxel space.** The Photogrammetric Record. 2011.

WOO, H., KANG, E., WANG, S. ; LEE, K.H. **A new segmentation method for point cloud data.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002.

YANG, B.; DONG, Z. **A shape-based segmentation method for mobile laser scanning point clouds.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, p. 19-30, 2013.

YANG, M. Y. ; FÖRSTNER, W. **Plane Detection in Point Cloud Data.** IGG : Technical Report. University of Bonn, 2010.

ZHANG, K.; CHEN, S. C.; WHITMAN, D.; SHYU, M. L., YAN, J.; ZHANG, C. **A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data.** Geoscience and Remote Sensing, v. 41, n. 4, 2003.

ZHANG, R. ; WU. J. ; LI, G. ; WANG, L. **A Mixed Algorithm for Building Facade Extraction from Point Clouds.** International Journal of Performability Engineering, v. 4, n. 6, p. 1119-1129, 2018.

ZOLANVARI, S. M., LAEFER, D. F., NATANZI, A. **Threedimensional building façade segmentation and opening área detection from point clouds.** ISPRS International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, 143, 134-149, 2018.